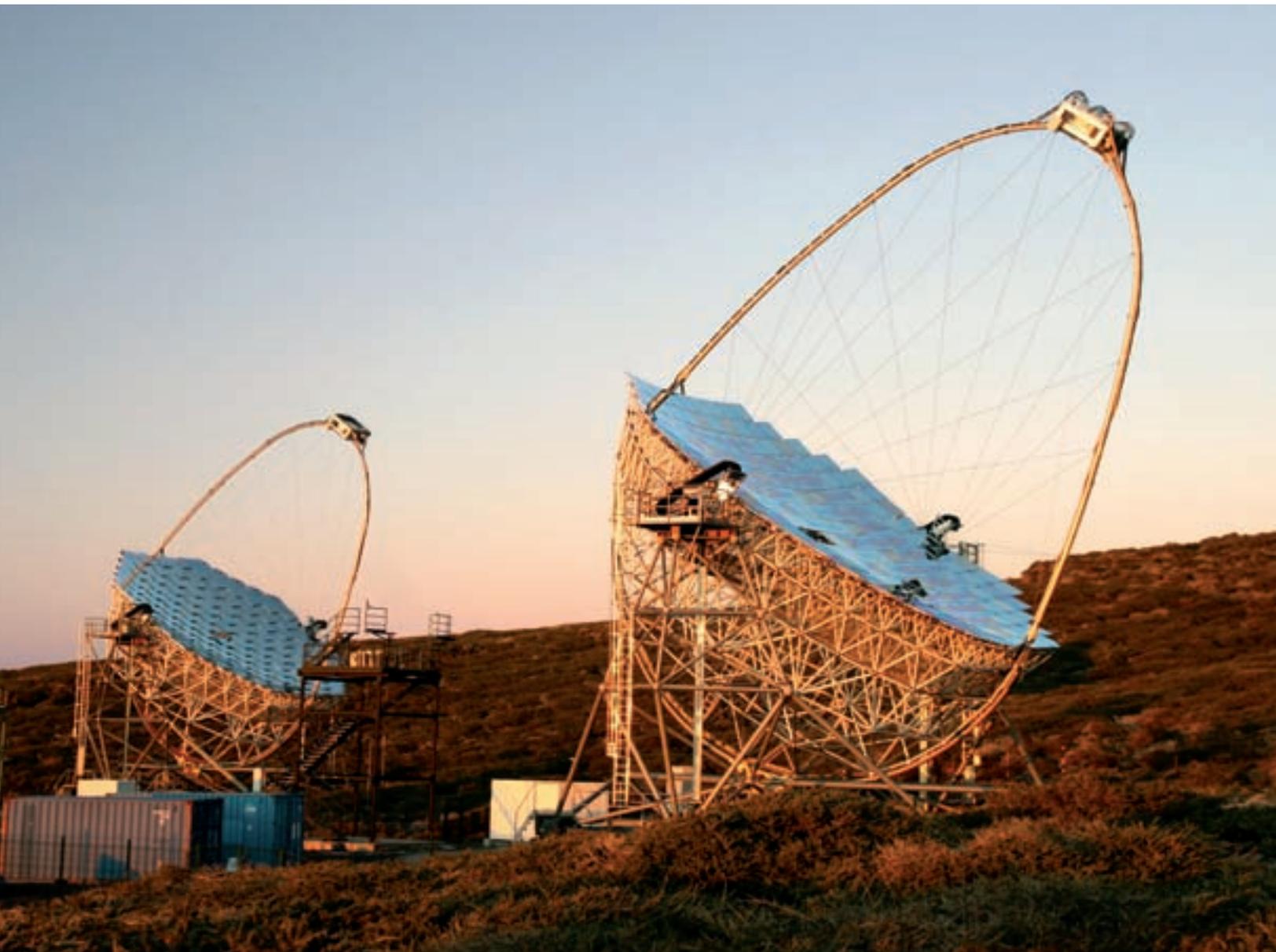




Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Stark im Verbund

Naturwissenschaftliche Grundlagenforschung an Großgeräten



FORSCHUNG

Ideen zünden!

Impressum

Herausgeber:

Bundesministerium
für Bildung und Forschung (BMBF)
Referat Naturwissenschaftliche Grundlagenforschung
11055 Berlin

Bestellungen:

schriftlich an den Herausgeber
Postfach 30 02 35
53182 Bonn
oder per
Tel.: 01805 – 262 302
Fax: 01805 – 262 303
(0,14 Euro/Min. aus dem deutschen Festnetz)

E-Mail: books@bmbf.bund.de
Internet: <http://www.bmbf.de>

Redaktion:

Dr. Kristina Böhlke, PT-DESY, Hamburg
Dr. Jens Kube, PT-DESY, Hamburg
Dr. Dieter Müller, GSI-PT, Darmstadt
Dr. Monica Pantea, BMBF, Bonn

Autoren:

Redaktionsbüro science & more
Dr. Ulrich Kilian, Stuttgart
Walter Greulich, Weinheim

Gestaltung, Grafik und Layout:

hausgemacht.net, Hamburg
Hedda Christians, Katja Peters

Korrektorat:

Lektorat SprungChance GbR, Bergold & Preuß, Bremen

Druckerei:

Rieckdruck, Hamburg

Wir danken:

Prof. Dr. Gisela Anton, Prof. em. Dr. Immo Appenzeller, Prof. Dr. Ralf Bender,
Prof. Dr. Johannes Blümer, Prof. Dr. Götz Eckold, Dr. Reinhold Haefner,
Dr. Klaus Ehret, Prof. Dr. Caren Hagner, Prof. Dr. Thomas Hebbeker,
Dr. Marc Hempel, Prof. Dr. Rolf-Dieter Heuer, Prof. Dr. Werner Hofmann,
Prof. Dr. Hans Hofsäss, Dr. Klaudia Hradil, Dr. Lucia Incoccia-Hermes,
Prof. Dr. Birgit Kanngießer, Prof. Dr. Robert Klanner, Prof. Dr. Konrad Kleinknecht,
Prof. Dr. Reiner Krücken, Dr. Olaf Kühnholz, Prof. Dr. Karlheinz Langanke,
Prof. Dr. Horst Lenske, Prof. Dr. Karl Mannheim, Prof. Dr. Ullrich Pietsch,
Prof. Dr. Andreas Quirrenbach, Prof. Dr. Dieter Reimers, Prof. Dr. Johanna Stachel,
Prof. Dr. Christian Stegmann, Prof. Dr. Joachim Stroth, Prof. Dr. Eberhard Umbach,
Prof. Dr. Richard Wagner, Prof. Dr. Norbert Wermes, Prof. Dr. Wilfried Wurth,
Prof. Dr. Helmut Zabel

Bonn, Berlin 2009

Weitere Informationen unter:

BMBF-Seiten zur naturwissenschaftlichen Forschung an Großgeräten:
<http://www.bmbf.de/de/98.php>

Forschungsschwerpunkte:

Übersicht: <http://bmbf-fsp.physik.uni-bonn.de>
ATLAS: <http://www.fsp101-atlas.de/>
CMS: <http://www.fsp102-cms.de/>
ALICE: <http://www.fsp201-alice.de/>
FLASH: <http://www.fsp-flash.de/>

Projektträger DESY: <http://pt.desy.de>
Projektträger GSI: <http://www.gsi.de/gsi-pt>

Physikalische Forschung allgemeinverständlich:

Welt der Physik: <http://www.weltderphysik.de>
Veranstaltungsreihe „Highlights der Physik“: <http://www.physik-highlights.de>

Bildnachweis:

Titelbild: MAGIC-Collaboration
Innenseiten: Seite 2: CERN, Seite 3 von links nach rechts: H. H. Heyer/ESO, Welt der Physik, Seite 4: DESY, Seite 5: FZK, Seite 6/7: FNAL (6), ESO (6), Pierre-Auger-Observatorium (6), icecube (6/7), DESY (7), ESRF (7), FRM II (7), CERN (7), Seite 11: ILL, Seite 12: Christian Schmid/DESY/CERN, Seite 13: CERN, Seite 14: Maximilien Brice/CERN, Seite 15: Jens Kube und hausgemacht., Seite 16: DESY, Seite 17: DESY und hausgemacht., Seite 18: CERN, Seite 19: Michael Hoch/CERN, Seite 20: Claudia Marcelloni/CERN, Seite 21: Dirk Rathje/Welt der Physik und hausgemacht., Seite 22: Joao Pequenao/CERN, Seite 23: CERN, Seite 24: Opera Collaboration, Seite 25: „Kosmische Spurensuche“/KAT-Broschüre und hausgemacht., Seite 26: KHuK und hausgemacht., Seite 28: ESO (oben), FZJ (unten), Seite 29: GSI, Seite 30: G. Otto/GSI, Seite 31: Antonio Saba/CERN, Seite 32: CERN, Seite 33: Maximilien Brice/CERN, Seite 34: AGATA (34), Seite 35: Jens Kube und hausgemacht. (35 oben), DESY (35 unten), Seite 36: DESY und hausgemacht., Seite 37: ZWE FRM II und hausgemacht., Seite 39: DESY und hausgemacht., Seite 41/42: BESSY/Kanngießer und hausgemacht. (41 oben), BAM (41 unten, 42), Seite 43: W. Schürmann/FRM II, Seite 44: G. Eckold und hausgemacht., Seite 45: ESO/WFI (45 optisches Bild), A. Weiß et al./MPIfR/ESO/APEX (45 Submillimeterbild), R. Kraft et al./NASA/CXC/CfA (45 Röntgenbild), Seite 46: ESO, Seite 47: Heike Uebel/Heraeus-Stiftung (oben), Pierre-Auger-Observatorium (unten), Seite 48: FZK, Seite 49: ESO, Seite 50: Universitäts-Sternwarte München, Seite 51: Marc-Andre Besel und Wiphu Rujopakarn/LBT, Seite 52: Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg – Landessternwarte, Seite 53: ECAP (oben), Universität Erlangen (unten), Seite 54: Antares-Kollaboration (oben und unten), Seite 55: hausgemacht., Seite 56: H.E.S.S. Collaboration (oben und unten), Seite 57: Robert Wagner/MPI für Physik, Seite 58: MAGIC Collaboration (58), ESO



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Stark im Verbund

Naturwissenschaftliche Grundlagenforschung an Großgeräten



Mit immer größeren Geräten sind Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus aller Welt auf der Suche nach immer kleineren Strukturen der Natur. Der Large Hadron Collider (LHC) am CERN in Genf ist das prominenteste Beispiel für eine Vielzahl von wissenschaftlichen Großgeräten, mit denen Forscherinnen und Forscher technologisches Neuland betreten und immer weiter in bislang unbekannte Dimensionen unserer Welt vorstoßen. Er wird neue Forschungsmöglichkeiten schaffen und einen noch besseren Einblick in die Entstehung und Zusammensetzung der Materie geben. Der LHC kann nur durch internationalen Kraftanstrengung möglich gemacht werden und erfordert neben enormen Investitionen die engagierte Zusammenarbeit von Tausenden von Wissenschaftlern.

Grundlagenforschung mit Großgeräten wird erst durch öffentliche Förderung möglich. Projektförderung für universitäre Forschung an Großgeräten vervielfacht das Wissen und Können von Spitzenforschern an Hochschulen in ganz Deutschland und damit auch den wissenschaftlichen Ertrag großer Forschungsinvestitionen. Sie spannt dabei den Bogen von der Qualifizierung talentierter junger Menschen bis hin zu nobelpreiswürdigen Forschungsergebnissen.

Die Projektförderung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung ermöglicht insbesondere jungen Wissenschaftlern, Experimente und Apparaturen für Großgeräte zu entwickeln und mit ihnen ihre Forschung weiter zu vertiefen. Diese Broschüre stellt an ausgewählten Beispielen vor, welches Potenzial durch diese Förderung aufgebaut wurde und wird – Deutschland baut in den nächsten Jahren mit dem europäischen Röntgenlaser European XFEL bei DESY in Hamburg und der Beschleunigeranlage für Forschung mit Antiprotonen- und Ionenstrahlung FAIR bei der GSI in Darmstadt zwei herausragende internationale Forschungsinfrastrukturen. An den herausragenden wissenschaftlichen Ergebnissen wird deutlich, welche enorme Wirkung strategisch klug eingesetzte Fördermittel erzielen können .

Große Forschungsfragen erfordern oft große Geräte und immer großen Enthusiasmus. Diese Broschüre zeigt, was an faszinierender Wissenschaft zustande kommt, wenn Ideen und Engagement der Forschung auf eine kontinuierliche und verlässliche Forschungsförderung treffen.

A handwritten signature in black ink, reading "Annette Schavan". The signature is fluid and cursive.

Prof. Dr. Annette Schavan, MdB
Bundesministerin für Bildung und Forschung

Inhaltsverzeichnis

Stark im Verbund	2
Hochenergiephysik	13
HERA – Das Riesenelektronenmikroskop	16
CMS – Der Eiffelturm am CERN	18
ATLAS – Eine Digitalkamera für 40 Millionen Bilder pro Sekunde – mit 80 Megapixeln!	20
OPERA – Die Suche nach dem Knick	24
Hadronen und Kerne	26
FAIR – Einzigartiger Doppelring	29
ALICE – Eine ganz besondere Suppe: Quark-Gluon-Plasma	31
Von EUROBALL über MINIBALL zu AGATA	33
Kondensierte Materie	35
FLASH – Besser als jeder Laser	39
Physik im Dienst von Kunst und Kultur	41
PUMA – Erfolgreiche Großforschungskatze	43
Astro- und Astroteilchenphysik	45
FORS – Das Arbeitspferd am Very Large Telescope	49
LUCIFER – Lichtbringer	51
ANTARES – Von oben oder von unten?	53
H.E.S.S. – Gammajäger in der Wüste	55
MAGIC – Ein neues Fenster zum All	57
Abkürzungsverzeichnis	59

Stark im Verbund

Grundlagenforschung ist notwendig – leider aber auch teuer! Denn je weiter die Wissenschaft voranschreitet, je kleiner die Strukturen sind, die erforscht werden, je tiefer der Blick ins Universum dringt, je komplexer die Fragestellungen werden – desto größer und leistungsfähiger müssen die Instrumente werden, um wissenschaftliches Neuland betreten zu können. Die Naturgesetze lassen uns sozusagen keine andere Wahl. Übrigens ist die Forschung mit Großgeräten keine Erfindung unserer Tage: Bereits im 16. Jahrhundert stellte die dänische Krone dem Astronomen Tycho Brahe die ganze Insel Ven samt Observatorium und nahezu unbegrenztes Kapital zur Verfügung. Das zeigte Erfolg: Brahes präzise Messungen von Sternpositionen öffneten die Tür zur modernen Astronomie.

Die europäischen Großgeräte der Wissenschaft, von denen in dieser Broschüre die Rede ist, sind ein wesentlicher Bestandteil der Forschungslandschaft. Sie bilden die Infrastruktur für zentrale Forschungsfragen. Durch ihre geballte experimentelle Kraft schaffen sie Möglichkeiten für die Grundlagenforschung, die internationale Maßstäbe setzen. Gerade deshalb stellt sich immer wieder die Frage, wie das Potenzial der Großgeräte am besten genutzt werden kann, wie es sich wissenschaftlich amortisiert. Eine Antwort darauf ist die Verbundforschung, d. h. die Projektförderung naturwissenschaftlicher Grundlagenforschung an Großgeräten durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Der Förderungsansatz der Verbundforschung zielt darauf ab, hervorragende Wissenschaftler deutscher Universitäten mit den Großgeräten zusammenzubringen, damit sie dort innovative Instrumente für den wissenschaftlichen Betrieb aufbauen können.

Von diesem Verbund von Universitäten und Großgerätebetreibern profitieren alle Beteiligten: Den Wissenschaftlern stehen die Maschinen zur Verfügung, die man für die Beantwortung zentraler Fragen in der Physik sowie anderer Naturwissenschaften braucht, und die Großgeräte werden durch die Projekte der Verbundforschung ständig weiterentwickelt. Denn ein Beschleuniger, eine Neutronenquelle oder ein Teleskop sind ja keine



An ATLAS, dem größten Teilchendetektor der Welt, sind über 2500 Wissenschaftler aus 37 Ländern beteiligt. Hier präsentiert sich ein Teil von ihnen am CERN, der „Heimat“ des Detektors.

innerhalb weniger Jahre fertig gestellten Forschungsanlagen, sondern dynamische Geräte, die an neue physikalische Fragestellungen mit innovativen Weiterentwicklungen angepasst werden. Genau diese treibende Funktion nimmt ganz wesentlich die Verbundforschung wahr. Die wissenschaftlichen Zentren holen sich zusätzliches Know-how in ihre Experimentierhallen, das stark an den Bedürfnissen der Nutzer orientiert ist, weil es von den Universitäten stammt. Die Förderung von Themen in der Verbundforschung, die eng mit einer Instrumenten- oder Methodenentwicklung zusammenhängen, führt zu einer ständigen Steigerung der Leistungsfähigkeit der Großgeräte. Die Zentren erweitern dadurch ihr Leistungsspektrum, ohne dass sie auf allen Forschungsgebieten gleichermaßen Expertise anbieten müssen.

Mit dem Mittel der Verbundforschung führt das BMBF also die besten Forscher aus Deutschland an den Großgeräten zusammen, um die Möglichkeiten dieser Geräte voll auszuschöpfen. Sie fördert den regen und fruchtbaren Austausch zwischen den Betreibern der Großgeräte und der externen Nutzergemeinde, der zur Konzeption neuartiger Experimente und zur Entwicklung innovativer Instrumente und Forschungsmethoden führt.

Kerne, Sterne, Teilchen und Materialien

Beim Stichwort Großgeräte denken die meisten vermutlich an die großen Beschleuniger und Detektoren der Elementarteilchenphysik. Historisch entstand die Verbundforschung jedoch in den 1950er-Jahren mit der Gründung des Bundesministeriums für Atomfragen, das von Anfang an Aufgaben im Bereich der Förderung der nuklearen Grundlagenforschung an sich zog. Sie hatte zunächst zum Ziel, Deutschlands Rückstand auf diesem Gebiet seit dem Ende des Zweiten Weltkriegs aufzuholen. Sehr bald kamen weitere Themen der Grundlagenforschung hinzu. In den 1960er-Jahren führte die vor allem durch die Hochenergiephysik vorangetriebene Konzentration um wenige Großgeräte dazu, den Begriff Verbundforschung zu prägen und das Konzept einer engen Verzahnung zwischen Zentren und Nutzern einzuführen. Dann wurde deutlich, dass auch die Neutronenforschung Großgeräte braucht und dass man mit der Synchrotronstrahlung aus den Teilchenbeschleunigern hervorragende Wissenschaft betreiben kann. Ende der 1980er-Jahre schließlich erfasste der Trend zu immer größeren Anlagen auch die Astrophysik, sodass wir heute eine vielfältige Großgerätelandschaft vor uns haben.

Die Verbundforschung fördert technische Innovationen, die immer von wissenschaftlichen Fragestellungen getrieben sind. Ausgehend von einer Forschungsidee, stellt sie universitären Gruppen die Mittel zur Verfügung, sich die entsprechende

Technologie am passenden Großgerät aufzubauen. Da sich diese Entwicklungen immer an der Grenze des technisch Machbaren abspielen, weiß die Verbundforschung um den langen Atem, den es von der ersten Idee bis zum fertigen Standardinstrument braucht – Wissenschaft an Großgeräten lässt sich nicht mit Instrumenten von der Stange betreiben. Typisch für die Verbundforschung ist deshalb, dass sie über die dreijährige Förderperiode, die sich im Wesentlichen an der Länge einer Doktorarbeit orientiert, hinaus auch neue Ideen fördert, wie diese Instrumente noch weiter verbessert werden können.

Welt der Physik

Der große Erfolg mit dem Jahr der Physik 2000 veranlasste BMBF und Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG), das Internetportal www.weltderphysik.de ins Leben zu rufen. Seit 2003 werden dort allgemein verständliche Artikel präsentiert – geschrieben von renommierten Wissenschaftlern und erfahrenen Fachjournalisten – über neue Forschungsergebnisse und öffentlich geförderte Projekte. Dieser Webdienst bietet somit einen Überblick über die Forschungslandschaft in Deutschland.

Zahlreiche zusätzliche Informationen, Nachrichten und Übersichten über Veranstaltungen und die Physik-Forschungs- und Lehrlandschaft öffnen weitere Türen in die Physikwelt. Viele Hochschulen und Forschungsinstitute fördern und unterstützen Welt der Physik durch vielfältige Beiträge und Bekanntmachungen, die DPG stellt gemeinsam mit der Astronomischen Gesellschaft das wissenschaftliche Kuratorium.



Das Very Large Telescope (VLT) der ESO ist das Flaggschiff der europäischen Astronomie.

Wie lange die gesamte Entwicklung eines Instruments braucht, ist von Forschungsgebiet zu Forschungsgebiet sehr unterschiedlich. In der Neutronenstreuung sind beispielsweise sechs Jahre bis zum Routinebetrieb typisch – die erste Förderperiode für den Aufbau des Instruments, die zweite für die Optimierung –, die Entwicklung eines Detektors in der Teilchenphysik misst sich hingegen in Jahrzehnten.

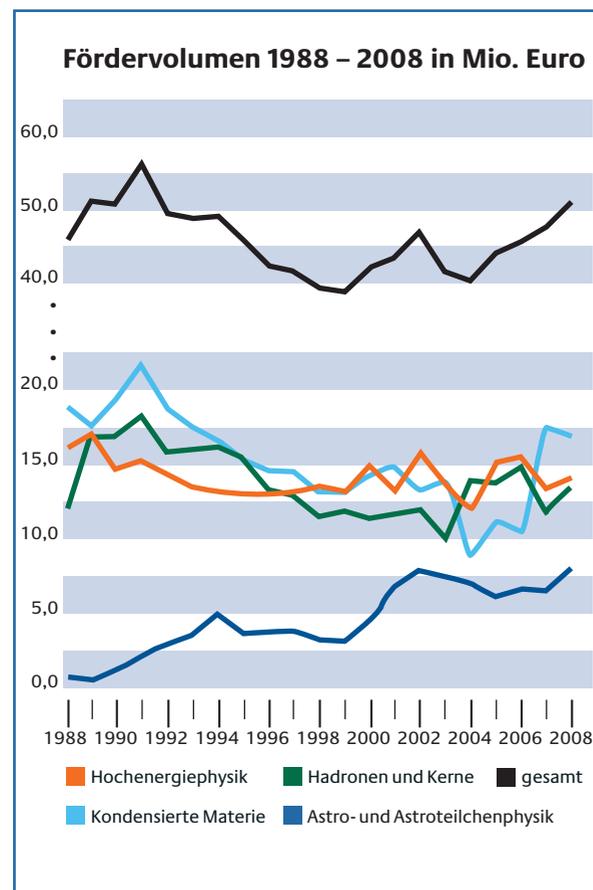
Aus Sicht der Wissenschaftler in den Projekten der Verbundforschung bietet sich an den Großgeräten der Zentren die einmalige Chance, sich die optimale, für die Forschung maßgeschneiderte Instrumentierung aufzubauen. Ihre Arbeit ist nur der wissenschaftlichen Fragestellung verpflichtet. Dadurch bieten sich ihnen ganz andere Möglichkeiten als in der Industrie. Da an den Projekten zahlreiche Doktorandinnen und Doktoranden beteiligt sind, ist dieses Fördermittel eine effiziente Nach-

wuchsförderung, von der auch die Zentren enorm profitieren. Die jungen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler wiederum lernen in den Projekten Methoden und Strategien zur Lösung komplexer Probleme kennen, was sie auch andere Herausforderungen erfolgreich angehen lässt – wer einen Detektor wie ATLAS baut, kann auch in der Industrie komplexe technologische Fragestellungen bewältigen.

Wenn sich auch niemals vorher abschätzen lässt, welche Ergebnisse sich bei einem Forschungsprojekt ergeben werden, so hat die Vergangenheit doch gezeigt, dass neue Großgeräte und neue Instrumente in aller Regel einen bedeutenden Erkenntnisfortschritt mit sich brachten. So wird es auch in Zukunft sein – Schritt für Schritt lernen wir mehr über die Natur.



Die Großforschungsgeräte ermöglichen mit ihren Anlagen nicht nur exzellente Forschung, sondern schaffen auch eine breit gefächerte Ausbildungslandschaft. Beim DESY beispielsweise können junge Menschen verschiedene gewerblich-technische, aber auch kaufmännische Berufe erlernen.



Im Gespräch: Prof. Dr. Eberhard Umbach, Direktor des Forschungszentrums Karlsruhe



Wie wichtig ist die Verbundforschung für Ihr Zentrum?

Umbach: Die Verbundforschung ist auch für das Forschungszentrum Karlsruhe von hoher Bedeutung, denn wir haben mit der nationalen Synchrotronstrahlungsquelle ANKA und der Astroteilchenphysik zwei große Aktivitäten, die unmittelbar von ihr profitieren. Das Interesse an der Verbundforschung geht aber weit über das Interesse einzelner Zentren hinaus, weil sie vor allem die Universitäten mit der Großforschung in nahezu optimaler Weise verbindet.

Gibt es für Sie besondere „Highlights“ der Verbundforschung?

Durch die Verbundforschung wurden zahlreiche exzellente Instrumente und viele weltweit führende Experimente gefördert. Diese haben Deutschland in den entsprechenden Forschungsgebieten internationale Spitzenpositionen beschert. Im Ausland hat man uns immer um dieses Förderinstrument beneidet. Die Zahl der insgesamt durch die Verbundforschung geförderten Nutzer aus Universitäten und außeruniversitären Forschungseinrichtungen dürfte mittlerweile mehrere Zehntausend betragen. Es gibt meines Erachtens kaum ein Förderinstrument der öffentlichen Hand, das derart effizient und erfolgreich gewirkt hat und mit vergleichsweise wenig Geld so viele Spitzenleistungen ermöglicht hat.

Wie attraktiv ist die Forschung an Großgeräten für junge Nachwuchswissenschaftler?

Für mich hat die Forschung an Großgeräten immer einen besonderen Reiz gehabt. In meiner

Postdoc-Zeit in Stanford/USA wurde ich vom „Großforschungs-Virus“ infiziert und habe seither immer mit Großforschung zu tun gehabt. Zwar bedeuten die häufigen Reisen zu den Großgeräten und die unter Erfolgsdruck stehenden Experimente zusätzlichen Aufwand und Stress. Das Flair eines Großgeräts und die zum Erfolg notwendige Teamarbeit, die meist auch einen entsprechenden Teamgeist hervorbringt, sind jedoch vor allem für junge Wissenschaftler ebenso wichtige Schlüsselerlebnisse wie die Einbindung in eine sehr internationale Wissenschaftsgemeinschaft mit den entsprechenden Kontakten.

Was nimmt ein Wissenschaftler, der ein Instrument mitentwickelt und gebaut hat, mit in ein Berufsleben außerhalb der Universität?

Erstens besondere Erfahrungen in der Projektarbeit. Dazu zählen eine sehr gute technische, finanzielle und zeitliche Planung des Aufbaus eines meist komplexen Instruments und die Vorbereitung und Durchführung der Experimente. Zweitens wird eine besonders konsequente Teamarbeit benötigt. Und drittens ist meist eine ungewöhnlich umfassende Zusammenarbeit mit verschiedenen anderen Partnern erforderlich, wie z. B. mit Projektpartnern, Mitarbeitern der Großforschungseinrichtung, Mitarbeitern der Lieferfirmen und zukünftigen Nutzern. Hinzu kommt, dass die Menschen, mit denen man dabei zusammenarbeitet, in der Regel einer sehr international zusammengesetzten Community angehören. Man lernt sehr schnell, dass man auf die Besonderheiten der einzelnen Kulturen Rücksicht nehmen muss.

Übersicht der Großgeräte und ihrer Standorte

Die Abkürzungen werden auf Seite 59 – 60 erläutert.

HOCHENERGIEPHYSIK

- 1 CERN, Genf, Schweiz/Frankreich
 - LHC: ATLAS, CMS, LHCb
 - NA62
- 2 DESY, Hamburg
 - HERA II: H1, ZEUS
- 3 Fermi National Accelerator Laboratory (FNAL), Chicago, USA
 - TEVATRON 2: CDF, D0

NEUTRINOPHYSIK:

- 4 Laboratori Nazionali del Gran Sasso CNCS, Italien: OPERA

HADRONEN UND KERNE

- 5 GSI, Darmstadt
 - UNILAC, SIS18, ESR, gekühlte Ionenstrahlen
 - HADES, FOPI, RISING, AGATA, FRS, SHIP, SHIPTRAP, Schwerionen-Tumorthherapie
- 6 Forschungszentrum / Jülich (FZJ): COSY
- 7 DESY, Hamburg: HERMES
- 8 CERN, Genf, Schweiz/Frankreich
 - ALICE, COMPASS, REX-ISOLDE
- 9 Stanford Linear Accelerator Center (SLAC), Stanford, USA: BABAR
- 10 Institut Laue-Langevin (ILL), Grenoble, Frankreich
- 11 Forschungszentrum Karlsruhe (FZK): GridKA

KONDENSIERTE MATERIE

PHOTONENQUELLEN:

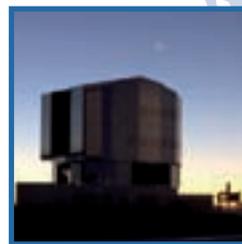
- 12 Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie: BESSY II
- 13 DESY, Hamburg
 - FLASH, PETRA III, DORIS
- 14 European Synchrotron Radiation Facility (ESRF), Grenoble, Frankreich
- 15 Forschungszentrum Karlsruhe (FZK): ANKA

NEUTRONENQUELLEN:

- 16 Paul-Scherrer-Institut (PSI), Villigen, Schweiz: SINQ
- 17 Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie: BER II
- 18 Institut Laue-Langevin (ILL), Grenoble, Frankreich
- 19 Technische Universität München: FRM II

POSITRONENQUELLEN:

- 20 Technische Universität München: FRM II



NUKLEARE SONDEN:

- 21 CERN, Genf, Schweiz/Frankreich
 - ISOLDE, REX-ISOLDE

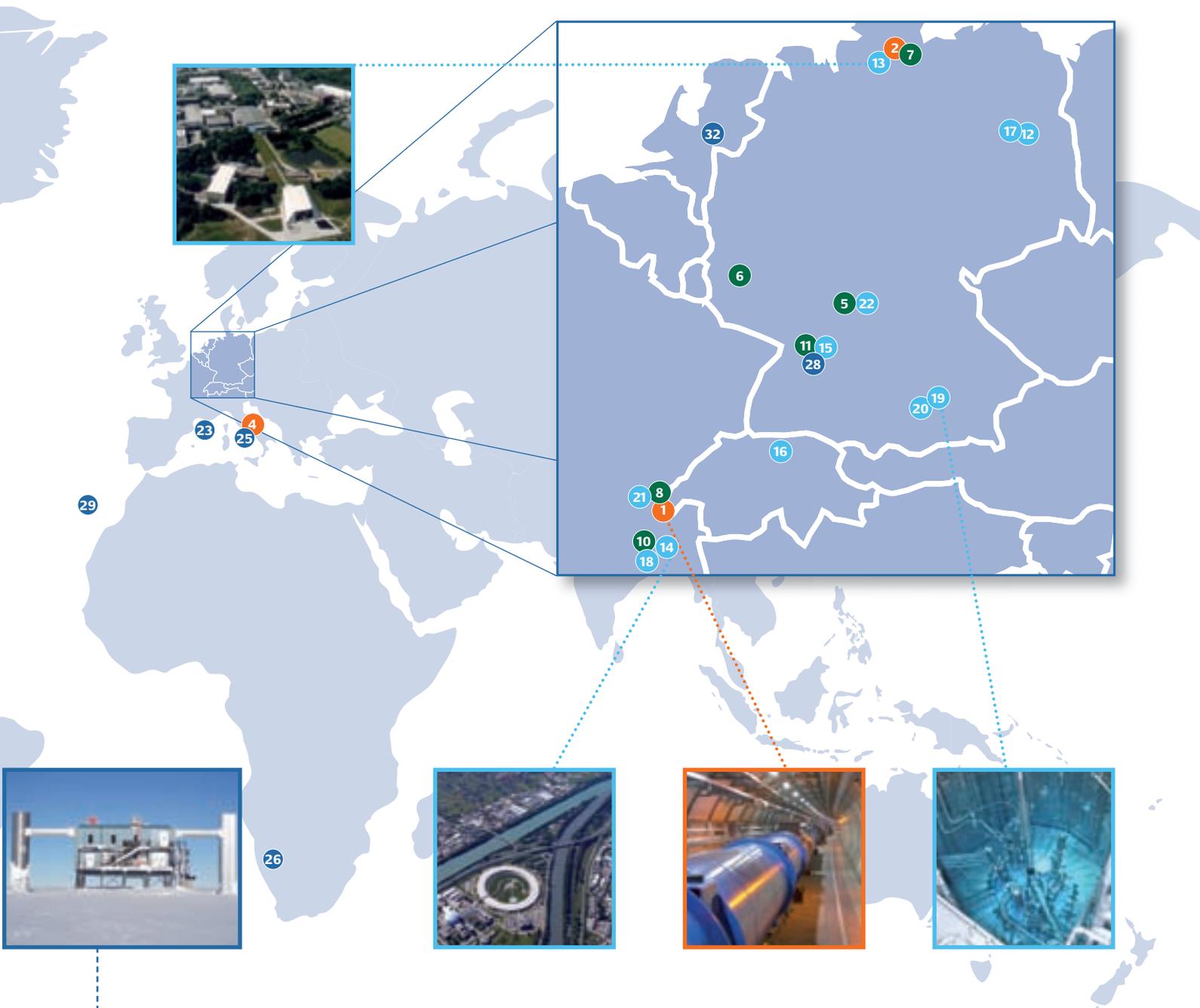
IONENSTRAHLEN:

- 22 GSI, Darmstadt
 - UNILAC, SIS 18

ASTROTEILCHENPHYSIK:

- 23 Mittelmeer, vor La Seyne-sur-Mer, Frankreich: ANTARES
- 24 bei Malargüe, Argentinien: Pierre-Auger-Observatorium
- 25 Laboratori Nazionali del Gran Sasso, Italien: GERDA
- 26 Gamsberg, Namibia: H.E.S.S.
- 27 Antarktis: IceCube
- 28 Forschungszentrum Karlsruhe (FZK): KATRIN
- 29 La Palma, Spanien: MAGIC





Südpol
↓
27

ERDGEBUNDENE ASTROPHYSIK

- 30 Llano de Chajnantor, Chile: APEX
- 31 Mount Graham, Arizona, USA: Large Binocular Telescope (LBT)
- 32 Exloo, Niederlande, und weitere europäische Standorte: LOFAR
- 33 Cerro Paranal, Chile: Very Large Telescope (VLT)
- 34 Atacama Wüste, Chile: ALMA

Die Karte zeigt die Großgeräte, an denen mit Mitteln der Verbundforschung innovative Instrumente aufgebaut wurden – eine beeindruckende globale Landschaft.

So funktioniert die Verbundforschung

Die Förderung der Grundlagenforschung an Großgeräten in Deutschland stützt sich auf mehrere Säulen. Zunächst ist der Bund am Bau und dem Betrieb der Großgeräte beteiligt. Beides erfolgt sowohl durch die Großforschungszentren der Helmholtz-Gemeinschaft als auch durch Institute der Leibniz-Gemeinschaft, der Max-Planck-Gesellschaft oder durch internationale Forschungsorganisationen wie CERN, ESRF, ESO und ILL, an denen Deutschland beteiligt ist. Beispielsweise liegt der deutsche Anteil an der Finanzierung des gesamten CERN-Budgets bei 20 Prozent – damit ist Deutschland der größte Beitragszahler. Diese Mittel fließen in die lokale Infrastruktur, insbesondere in den Bau des LHC-Beschleunigers.

Der Bau eines Großgerätes vollzieht sich in einem längeren Lebenszyklus. Am Anfang stehen die Idee und der Blick in die Zukunft: Welche zentralen Fragen stehen im Fokus der Wissenschaft? Welche Geräte werden durch innovative technologische Fortschritte ermöglicht? Welches Gerät stößt für sein Gebiet die Tür zu neuen Forschungsansätzen auf? Wissenschaftliche und wissenschaftspolitische Aspekte werden bedacht, relevante Organisationen und Personen in die Beratung einbezogen, eine Vorschlagsliste von Projekten, die aus forschungspolitischer Sicht wünschenswert sind, wird erstellt. Aus dieser Liste werden anschließend die Projekte ausgewählt, die vorrangig zu realisieren sind, und zu einer Roadmap zusammengefasst. Jedes einzelne dieser ausgewählten Projekte durchläuft nun vom detaillierten technischen Report über die Entwicklung und Ausführung bis zum Abschluss seinen Realisierungsprozess, an dessen Ende der Regelbetrieb steht.

Hat ein Großgerät nach dieser langen Entwicklungsphase von den ersten Konzepten bis zur instrumentellen Ausstattung den wissenschaftlichen Betrieb erreicht, beginnt der Forscheralltag: Forscher aus der ganzen Welt nutzen das Potenzial der Anlage für ihre spannenden Projekte, arbeiten an ihren Doktorarbeiten, beantragen Messzeiten bei den Forschungszentren und Fördermittel bei den nationalen Geldgebern, in Deutschland beispielsweise bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG).

Die Projektförderung des BMBF im Rahmen der Verbundforschung bildet gewissermaßen die Brücke zwischen dem Bau eines Großgerätes und ihrer Nutzung. Sie verzahnt die Zentren mit den

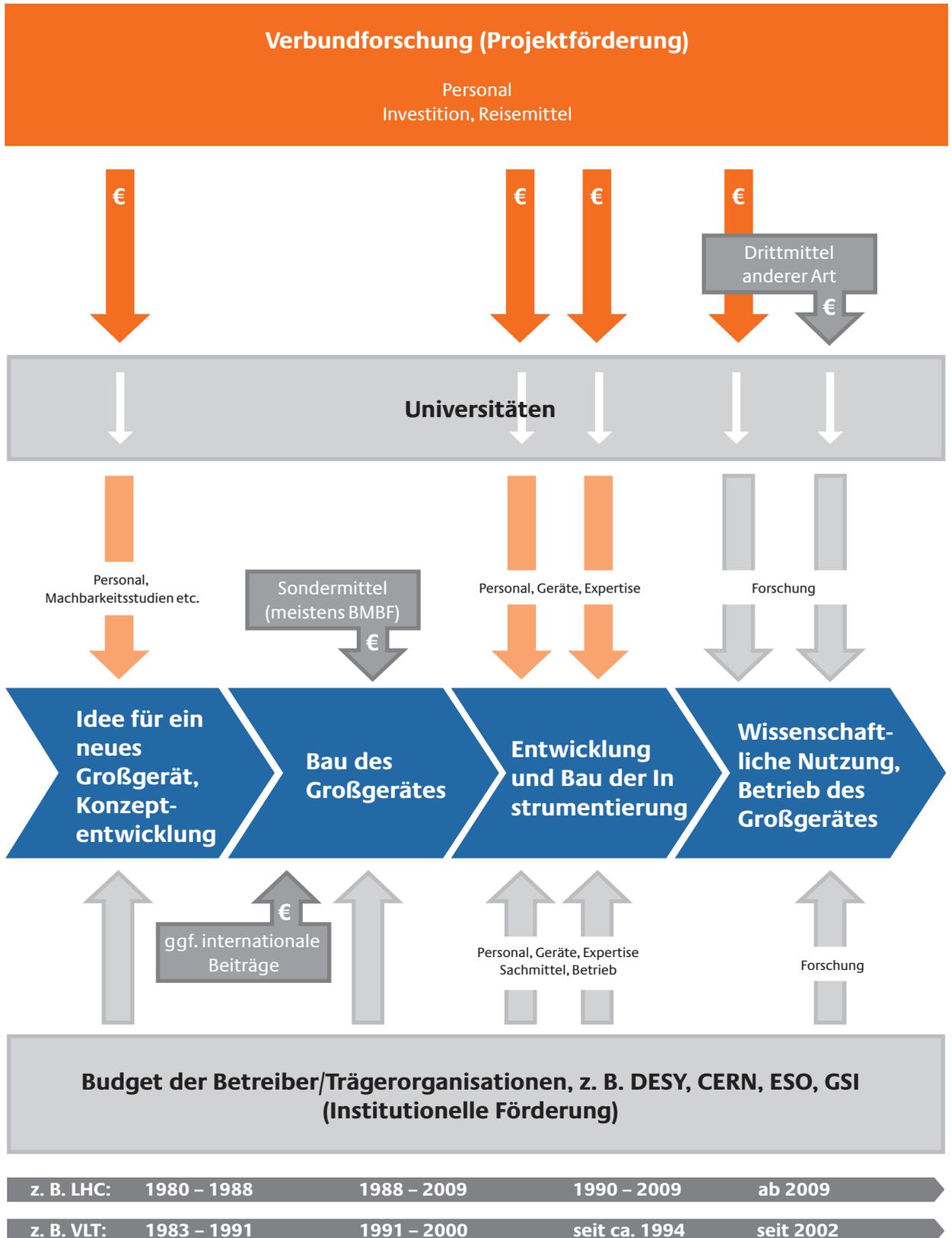
Universitäten und schafft in wechselseitiger Befruchtung eine Expertise an den Großgeräten, von der alle späteren Nutzer in großem Maße profitieren. Da im Zentrum der Verbundforschung die innovative instrumentelle Ausstattung der Großgeräte steht, werden in erheblichem Umfang Sachmittel und Investitionen in Materialien und Hardware übernommen.

Schließlich möchte die Verbundforschung mit der Entwicklung neuer Technologien die wissenschaftliche Leistungsfähigkeit der Großgeräte steigern. Diese Mittel kommen gleichzeitig auch der universitären Ausbildung und dem talentierten naturwissenschaftlichen Nachwuchs zugute. Auch die Universitäten decken einen Teil der Projektkosten ab: Erst universitäre Eigenmittel und BMBF-Fördermittel zusammen garantieren im internationalen Wettbewerb eine deutliche Sichtbarkeit, die maßgebliche Beiträge im Bereich der wissenschaftlichen Erkenntnisse und Publikationen sichert.

Ausdauer in der Forschung, Ausdauer in der Förderung

Auch ein Antrag auf Projektförderung durch die Verbundforschung hat einen längeren Lebenszyklus. Er beginnt mit der Idee für ein wissenschaftliches Instrument. Dabei berücksichtigt der Antragsteller, beraten durch das BMBF und die vom BMBF beauftragten Projektträger, die aktuellen Trends und Entwicklungen in der Wissenschaft sowie die strategische Ausrichtung und die Prioritäten der Forschungspolitik.

Die eingereichten Anträge einer Förderrunde werden einem eigens berufenen Gutachtergremium vorgelegt, das aus Expertinnen und Experten auf dem jeweiligen Gebiet besteht. Ein erfolgreiches Projekt läuft in der Regel drei Jahre und wird in dieser Zeit vom zuständigen Projektträger begleitet und anhand jährlicher Zwischenberichte koordiniert. Der ausführliche Schlussbericht wird wieder den Gutachtern zur Bewertung vorgelegt und veröffentlicht – schließlich wurde die Forschung aus Steuergeldern finanziert. Oftmals liegt zu diesem Zeitpunkt bereits ein neuer Antrag mit frischen Ideen auf dem Tisch, wie man ein Instrument weiter verbessern und ausbauen kann – der wissenschaftliche Fortschritt ruht nie.



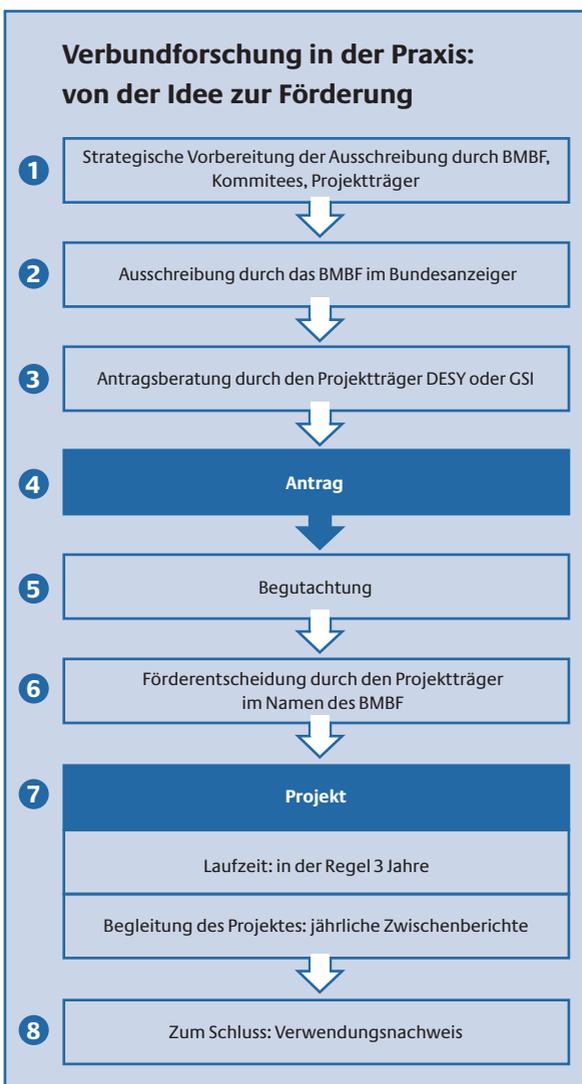
Bereits vor der Antragsstellung werden mögliche Kooperationspartner bei anderen Forschungsgruppen, die ähnliche Ansätze verfolgen, gesucht. Gerade in der Forschung an Großgeräten ist es wichtig, frühzeitig Allianzen zu bilden – anders sind die technologischen und finanziellen Herausforderungen heute kaum noch zu bewältigen. Zudem profitieren die späteren Nutzer davon, wenn verschiedene Forschungsansätze und -bedürfnisse in die Entwicklung eines Instruments einfließen. Die Verbundforschung fördert also nicht nur die Zusammenarbeit zwischen Großgeräten und Universitäten, sondern auch die der Universitäten untereinander. In diesem Sinne wirkt sie positiv auf die Bündelung von Kräften und die Gruppierung von Know-how um die zentralen Forschungsfragen herum.

Die Forschungsschwerpunkte

Um den Trend zur überregionalen Zusammenarbeit in der Verbundforschung noch weiter zu stärken, wurde 2006 ein neues strategisches Wettbewerbselement aufgelegt: die Forschungsschwerpunkte (FSP). Die Förderung zielt auf die Zusammenarbeit der jeweils besten Fachbereiche in Forschungsnetzwerken, angesiedelt an einem Großgerät der naturwissenschaftlichen Grundlagenforschung. Damit soll Spitzenforschung langfristig unterstützt werden, die dann auch im globalen Wettbewerb ihren Platz behauptet. Außerdem sichern die Forschungsschwerpunkte die Qualität der Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses und strahlen weit in die Wissenschaftslandschaft hinaus: „Leuchttürme“ der Forschung.

Drei der vier bisher eingerichteten Forschungsschwerpunkte sind am LHC beheimatet: ATLAS und CMS suchen das Higgs-Teilchen, ALICE erforscht die Eigenschaften des Universums zu Beginn seiner Entwicklung. Komplettiert werden sie durch die einmalige Photonenquelle FLASH am DESY, mit der die Materie auf der Nanoskala beleuchtet wird. FLASH wird auf diesem Gebiet äußerst wichtige Pionierarbeiten beisteuern.

- ATLAS: <http://www.fsp101-atlas.de>
- CMS: <http://www.fsp102-cms.de>
- ALICE: <http://www.fsp201-alice.de>
- FLASH: <http://www.fsp-flash.de>



Forschung mit Neutronen am Institut Laue-Langevin



Welche Stellung nimmt das Institut Laue-Langevin (ILL) unter den Großforschungsgeräten ein?

Prof. Dr. Richard Wagner, Direktor des ILL: Seit ca. 35 Jahren ist der 58-MW-Hochflussreaktor des

Institut Laue-Langevin in Grenoble unter den Großgeräten für die Forschung mit Neutronen die intensivste und wissenschaftlich produktivste Neutronenquelle der Welt. In dieser Zeit sind vom ILL auch bahnbrechende Impulse in der Entwicklung neuer Instrumente, Methoden und Techniken für die Neutronenstreuung ausgegangen. Das ILL hat demzufolge im Netzwerk der europäischen Neutronenforschungseinrichtungen, in denen insbesondere auch die deutschen Quellen in München, im Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie und im GKSS-Forschungszentrum Geesthacht eine bedeutende Rolle spielen, die Rolle des „Flaggschiffes“. Als europäische „User-Facility“ stellt das ILL 36 Instrumente für die Erforschung kondensierter Materie zur Verfügung – darunter 10 Instrumente, die als sog. Collaborative Research Group (CRG) Instrumente von verschiedenen europäischen Forschergruppen vorwiegend für eigene Forschungsprojekte gebaut worden sind –, die jährlich von mehr als 1250 Wissenschaftlern genutzt werden.

Wie stark profitiert das ILL von der Verbundforschung?

Neben der institutionellen Förderung hat das BMBF in den letzten 25 Jahren im Rahmen seiner Verbundforschungsprogramme „Physik der Kondensierten Materie“ und „Hadronen- und

Kernphysik“ den Bau und den Betrieb von sieben CRG-Instrumenten sowie die Nutzung der anderen wissenschaftlichen Einrichtungen am ILL durch Arbeitsgruppen von – gegenwärtig 29 (!) – deutschen Universitäten nachhaltig gefördert. Damit hat die BMBF-Verbundforschung auch ganz wesentlich dazu beigetragen, dass das ILL von vielen deutschen Wissenschaftlern als „deutsche“ Neutronenquelle betrachtet wird, an der zahlreiche bahnbrechende Arbeiten durchgeführt worden sind. Nicht zuletzt haben diese ganz wesentlich zu dem großen Ansehen beigetragen, das die deutsche Forschung mit Neutronen weltweit genießt. Umgekehrt haben die deutschen Wissenschaftler entscheidend das wissenschaftliche Leben am ILL befruchtet und das internationale Flair des Instituts mit geprägt.

Die von deutschen Universitäten am ILL betriebenen CRG-Verbundforschungsinstrumente sind zum Teil mit dem insbesondere im Forschungszentrum Jülich und am Helmholtzzentrum Berlin vorhandenen Know-how und der dort vorhandenen technologischen Infrastruktur entwickelt und gebaut worden. Insofern hat die BMBF-Verbundforschung indirekt auch zu einer segensreichen Partnerschaft zwischen deutschen Universitäten und den heutigen Helmholtz-Zentren beigetragen, und dies bereits zu Zeiten, als das deutsche Wissenschaftssystem noch als hochgradig „versäult“ betrachtet wurde!

**Prof. Dr. Rolf-Dieter Heuer,
CERN-Generaldirektor**



Grundlagenforschung ist heute mehr und mehr Großgeräteforschung. Um immer weiter in die Geheimnisse der Materie eindringen zu können, brauchen wir gerade in der Elementarteilchenphysik – aber auch in der Kernphysik,

der Erforschung Kondensierter Materie und der Astronomie – Geräte, die noch höhere Energien erreichen, noch brillantere Strahlung produzieren, noch tiefer ins Universum blicken. Mit jedem neuen Gerät betreten wir wissenschaftliches Neuland und verstehen immer besser, was Mikrokosmos und Makrokosmos „zusammenhält“ und was die beiden verbindet. Grundlagenforschung unterscheidet den Menschen von anderen Lebewesen, sie gehört als Kulturgut zum Menschen. Grundlagenforschung ist eine Voraussetzung für angewandte Forschung, und oftmals ergeben sich Anwendungen auch direkt aus der Grundlagenforschung. Wenn jemand Röntgen damals gebeten hätte, eine Untersuchungsmethode zu finden, wie man Krankheiten oder Veränderungen im Körper finden kann, hätte er vermutlich nicht auf Strahlung gesetzt.

Großforschungseinrichtungen wie das CERN und andere Forschungszentren sind zudem Anziehungspunkte für Ingenieure und Techniker aus aller Welt. Der beste „Spin-Off“ aus der Grundlagenforschung sind junge Leute, die an vorderster Front der Forschung und der Technologie ausgebildet werden, die eigene Forschungsprojekte haben, die lernen, in Gruppen zu arbeiten und sich in Gruppen zu behaupten, und die international arbeiten. Dies ist sehr attraktiv auch für die Ingenieurwissenschaften, daher verstärken wir unsere Bemühungen, deutsche Ingenieure schon in ihrer Ausbildungsphase zum CERN zu holen.

Die Wissenschaftler, die an den Großforschungseinrichtungen arbeiten, kommen überwiegend aus den Universitäten. Das CERN zum Beispiel hat etwa 2500 Mitarbeiter, aber über 9000 registrierte Gastwissenschaftler, DESY hat allein 2000 Nutzer der Synchrotronstrahlung.

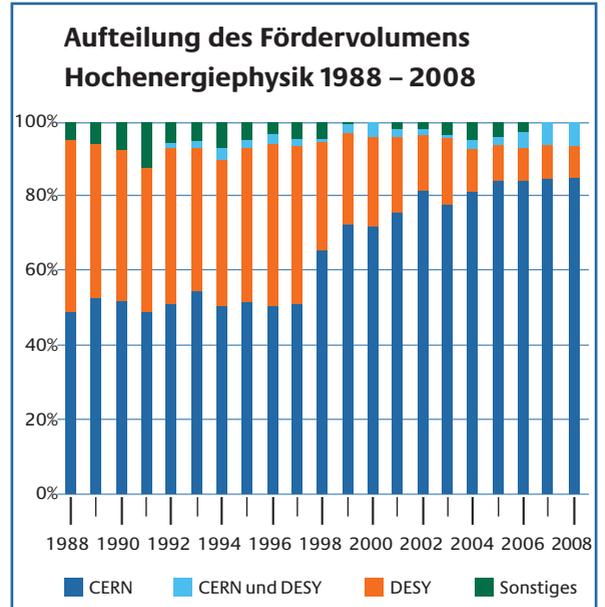
Deswegen ist es sehr wichtig, diese Gastwissenschaftler, diese Nutzer an der Ausstattung der Großgeräte zu beteiligen; nicht nur, weil z. B. ein Detektor am LHC vom CERN gar nicht allein zu planen, zu bauen und zu betreiben wäre, sondern auch, weil das Know-how der beteiligten Institute so wichtig ist. Die Verbundforschung fördert genau diese Symbiose und garantiert die Nachhaltigkeit in dieser faszinierenden Forschung.

Große Geräte für kleine Teilchen

Hochenergiephysik

Beim Stichwort Großgeräte denken viele Physiker zunächst an die Elementarteilchenphysik: je kleiner die Untersuchungsobjekte, desto größer die Maschinen. Dieser Zusammenhang ergibt sich aus einer relativ einfachen physikalischen Notwendigkeit: Je tiefer man in die Geheimnisse der Materie eindringen will, desto mehr Energie ist nötig, diese Materie „aufzuknacken“, um ihre Struktur zu enträtseln. Deshalb wurde am CERN, das im Namen ja noch den ursprünglichen Forschungsauftrag Kernphysik trägt, schon kurz nach seiner Gründung der erste Teilchenbeschleuniger in Betrieb genommen. 1959 wurde das Deutsche Elektronen-Synchrotron DESY gegründet und mit dem Bau des gleichnamigen Beschleunigers begonnen. HERA, der größte Beschleuniger am DESY, nahm 1992 den Forschungsbetrieb auf und war das bis dahin größte wissenschaftliche Projekt in Deutschland, zu dem insgesamt elf Länder beitrugen – dieses „HERA-Modell“ der internationalen Zusammenarbeit haben die meisten nachfolgenden Großgeräte übernommen.

Die Erfolge der beiden Institutionen CERN und DESY herauszustellen, ist etwa so notwendig, wie die Beiträge Albert Einsteins zur modernen Physik zu würdigen. Einstein kennt jedes Kind, und CERN und DESY stehen quasi synonym für die Elementarteilchenphysik. Ohne die LEP-Experimente am CERN hätten wir heute kein Standardmodell, ohne HERA am DESY wüssten wir nicht, was im Innern eines Protons vor sich geht. Beide Einrichtungen waren mit ihren Instrumenten wesentlich an der großen Leistung der Physik des 20. Jahrhunderts beteiligt, die Fülle der makroskopischen Materieerscheinungen auf eine kleine Zahl fundamentaler Bausteine und die zwischen ihnen herrschenden Kräfte zurückführen zu können. Sechs Leptonen, sechs Quarks, drei Wechselwirkungen – sie halten die Welt im Innersten zusammen.



Ein historischer Moment am CERN: Am 10. September 2008 wurde der erste Strahl erfolgreich durch den LHC gelenkt.

Damit ist die Elementarteilchenphysik aber nicht am Ende, ganz im Gegenteil. Viele fundamentale Fragen sind noch offen, viele Details harren noch ihrer Entschlüsselung. Eine dieser Kernfragen ist die nach der Masse der Elementarteilchen: Woher kommt sie, worin liegt ihr Ursprung? Im Standardmodell werden zunächst alle Teilchen als masselos betrachtet, denn nur so lassen sich physikalisch und mathematisch konsistent die Kräfte zwischen den Elementarteilchen beschreiben. In der Natur haben aber fast alle Teilchen eine Masse. Deshalb dachten sich der britische Physiker Peter Higgs und andere in den 1960er-Jahren einen Mechanismus aus, der den Teilchen eine Masse gibt, ohne das „Grundgerüst“ des Standardmodells zu verletzen. Seine experimentelle Bestätigung ist eine der Hauptauf-

gaben des LHC. Gesucht wird das Teilchen, das den Higgs-Mechanismus vermittelt, das so genannte Higgs-Boson. Die Detektivrolle übernehmen die beiden Detektoren des LHC, ATLAS und CMS. Doch sie suchen auch nach Physik jenseits des Standardmodells, nach neuen Teilchen, nach Überraschungen, die die Physik voranbringen.

An der Suche nach dem Higgs-Boson ist auch die Verbundforschung beteiligt, denn zahlreiche Komponenten der beiden Detektoren ATLAS und CMS wurden an deutschen Universitäten entwickelt. Überhaupt ist das „Blühen der Hochenergiephysik in Deutschland allein der Verbundforschung zu verdanken“, zieht Prof. Dr. Konrad Kleinknecht, der den Großteil seines Forscherlebens am CERN zubrachte,



Durch einen Spezialschacht wird der letzte der 1746 supraleitenden Magneten in den Tunnel des LHC hinabgelassen. Er ist einer der 1232 Dipolmagneten, mit denen die Teilchenstrahlen auf ihre 27 km lange Kreisbahn gezwungen werden.

Bilanz. Seine Arbeitsgruppe konnte u. a. erstmals die direkte CP-Verletzung nachweisen. „Bevor es die Verbundforschung gab, war es völlig unbekannt, dass eine Universität an einem Großgerät arbeitet.“ In den letzten zwölf Jahren wurden durch die Verbundforschungsförderung den deutschen Hochschulen zum Bau der Detektoren am LHC vom BMBF etwa 120 Mio. € an Fördermitteln bewilligt.

Die Hochenergiephysik sucht nicht nur nach weiteren neuen Teilchen. Auch die bekannten geben noch jede Menge Rätsel und Fragen auf, viele Details sind noch offen. So beschäftigt man sich am CERN auch weiterhin mit der CP-Verletzung, dem unterschiedlichen Verhalten von Materie und Antimaterie, und widmet sich der experimentellen Überprüfung von fundamentalen Parametern, die in der Theorie genau berechnet und vorhergesagt werden.

Auch Neutrinos haben eine Masse

Zu den merkwürdigen Teilchen des Standardmodells gehört das Neutrino. Es wurde bereits 1930 von dem Österreicher Wolfgang Pauli als Hypothese ins Spiel gebracht, um den Betazerfall des Neutrons zu erklären. Doch schon Pauli befürchtete, dass der Nachweis dieses Teilchens nicht ganz einfach sein dürfte, weil es mit anderer Materie nur ganz selten in Wechselwirkung tritt. In der Tat gelang der Nachweis erst über 20 Jahre später, im Jahr 1956. Das Tau-Neutrino – zu jedem Lepton (Elektron, Myon und Tauon) gehört jeweils ein Neutrino – wurde gar erst im Jahr 2000 erstmals im Experiment beobachtet. Auch die Frage, ob Neutrinos eine Masse besitzen, galt lange als offen, wird aber inzwischen mit Ja beantwortet. Denn Neutrinos wandeln sich periodisch ineinander um – sie oszillieren –, wofür eine Massendifferenz zwischen den Neutrinoarten Voraussetzung ist. Aber viele grundlegende Eigenschaften der Neutrinos, wie zum Beispiel ihre Masse, sind derzeit noch nicht genau bekannt – ihre Untersuchung ist Gegenstand vielfältiger Aktivitäten der Grundlagenforschung an Großgeräten. Die genaue Kenntnis der Neutrinoeigenschaften ist grundlegend für das physikalische Verständnis des Aufbaus der Materie.

Forschungsschwerpunkt ATLAS

Der BMBF-Forschungsschwerpunkt FSP-101 „Physik an der Teraskala mit ATLAS am LHC“ ist ein Forschungsnetzwerk, in dem sich mehr als 150 Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen aus dreizehn deutschen Universitäten, dem DESY und dem Max-Planck-Institut für Physik zusammengeschlossen haben. Schwerpunkt der Forschung sind Experimente zu aktuellen Fragestellungen der Elementarteilchenphysik bei hohen Energien mit dem ATLAS-Detektor am LHC beim CERN in Genf. ATLAS ist wahrscheinlich das größte Messgerät, das jemals für die Grundlagenforschung gebaut wurde. An ihm sind mehr als 2500 Physiker aus aller Welt beteiligt.

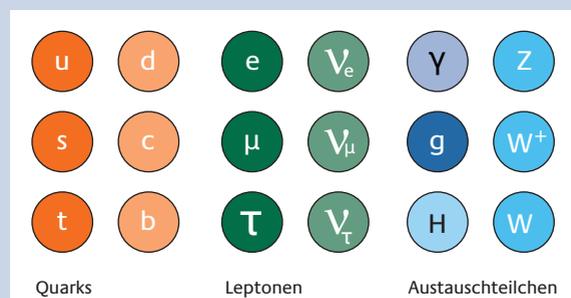
Forschungsschwerpunkt CMS

Der Forschungsschwerpunkt FSP-102 „Elementarteilchenphysik mit dem CMS-Experiment“ gehört zu den ersten drei Forschungsnetzwerken, die durch dieses neue Förderinstrument des BMBF unterstützt werden. In ihm beteiligen sich mehr als 70 Wissenschaftler aus drei deutschen Universitäten und dem Großforschungszentrum DESY am Aufbau und an der Inbetriebnahme des CMS-Experiments. CMS ist eines von vier Experimenten, die in internationaler Zusammenarbeit von Wissenschaftlern, Ingenieuren und Technikern am Large Hadron Collider LHC des Europäischen Labors für Teilchenphysik CERN entwickelt und aufgebaut werden.

Standardmodell der Teilchenphysik

Das im 20. Jahrhundert entwickelte Standardmodell der Elementarteilchenphysik konnte die Fülle der Materieerscheinungen auf nur wenige fundamentale Bausteine, die in drei Generationen vorkommen, zurückführen. Für die „normale“ und stabile Materie reicht schon die erste Generation allein: das Up- und das Down-Quark (u, d) sowie das Elektron (e) mit zugehörigem Neutrino (ν_e). Die vier anderen Quarks sowie die schwereren Geschwister des Elektrons – Myon (μ) und Tauon (τ) – entstehen nur in Teilchenprozessen und zerfallen schnell wieder. Zwischen den Materieteilchen wirken drei fundamentale Kräfte, die von Austauschteilchen – dem Gluon (g) für die Starke Kraft, dem Photon (γ) für die elektromagnetische Wechselwirkung und den Vektorbosonen W und Z für die schwache Kraft – vermittelt werden. Eine der großen

Aufgaben der Elementarteilchenphysik ist es, auch die vierte in der Natur vorkommende Kraft, die Schwerkraft, konsistent in dieses Bild einzubauen. Die Aufgabe des LHC am CERN besteht vor allem darin, das Higgs-Teilchen (H) zu finden, das für die Masse der anderen Teilchen verantwortlich ist.



HERA – Das Riesenelektronenmikroskop

Im Sommer 2007 trat ein einzigartiges Instrument seinen Ruhestand an: HERA. Der Teilchenbeschleuniger, der seinen Betrieb 1992 aufnahm, war das größte deutsche Forschungsinstrument und – für die Wissenschaft noch wichtiger – die einzige Beschleunigeranlage weltweit, die Elektronen und Protonen, die beiden Bausteine des Wasserstoffatoms, aufeinanderprallen ließ. Dabei dringen die Elektronen tief in das Proton ein und tasten sein Inneres regelrecht ab. In diesem Sinne war HERA also ein Riesenelektronenmikroskop.

Vier große Experimente gab es an HERA, untergebracht in vier unterirdischen Hallen. Die beiden Kollisionsexperimente H1 und ZEUS machten 1992

den Auftakt. Sie kümmerten sich um den Zusammenprall von Elektron und Proton und die Frage: Wie sieht es im Inneren des Protons aus? Das Elektron ist die ideale Sonde dafür, denn es trifft im Proton auf einen von dessen Bausteinen, auf ein Quark, und schlägt dieses aus dem Proton heraus. Quarks können als einzelne Teilchen nicht existieren, so dass sich sofort ein ganzes Bündel neuer Hadronen aus der Energie der Kollision bildet, die ihre Spuren in den beiden Detektoren hinterlassen. Aus ihnen lassen sich Rückschlüsse auf die innere Struktur des Protons ziehen. Hadronen sind Teilchen, die aus zwei oder drei Quarks zusammengesetzt sind. Die Bestandteile der Atomkerne, die Neutronen und die Protonen, sind zwei Beispiele für Hadronen.



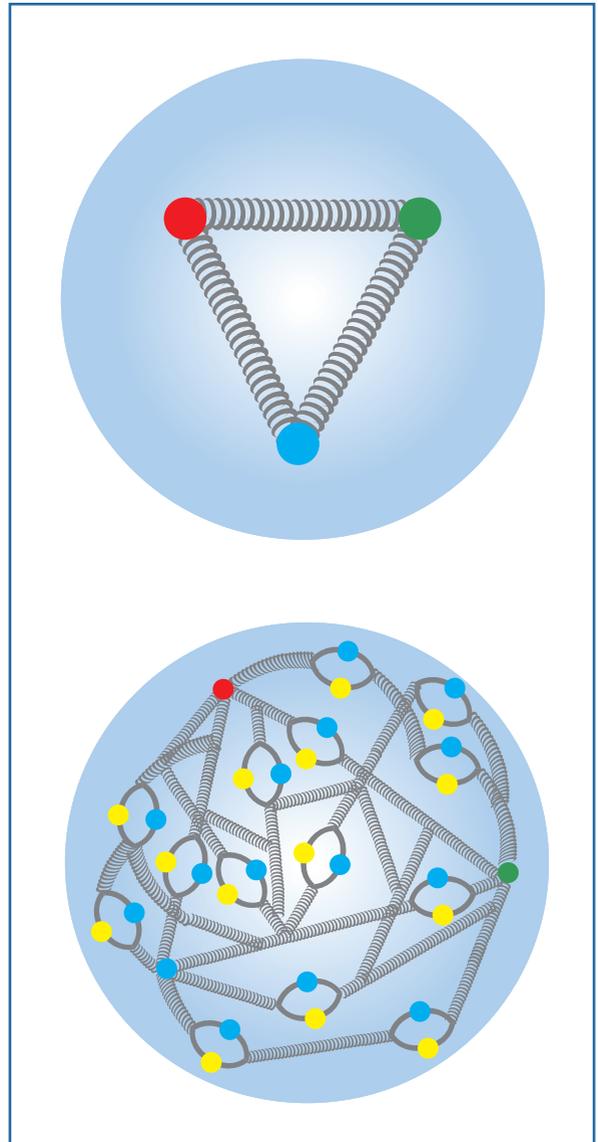
Der Blick in den 6,3 km langen Tunnel des HERA-Beschleunigers zeigt oben die supraleitenden Magnete zur Führung der Protonen und darunter den Elektronenring. Was passierte, wenn die Protonen und Elektronen mit hoher Energie zusammenstießen, beobachteten empfindliche Detektoren. Die Auswertung ihrer Daten wird noch einige Zeit in Anspruch nehmen.

Dank der Förderung durch die Verbundforschung konnten deutsche Universitätsgruppen ganz maßgeblich zu Entwicklung und Bau der HERA-Experimente beitragen. Beispiele sind die Kalorimeter zur Energiemessung von H1 und ZEUS, die neue Maßstäbe auf dem Gebiet der Kalorimetrie gesetzt haben, und die Präzisionsvertexdetektoren. ZEUS' Kalorimeter bestand aus abwechselnden Lagen von angereichertem Uran und Szintillatorplatten, in denen die hindurchfliegenden Teilchen Lichtblitze auslösten. Der Vorteil dieses Kalorimeters lag darin, dass es Elektronen und Hadronen quasi gleich behandelte: Beide erzeugten das gleiche Signal. Dadurch konnte man die Energie eines Teilchens direkt ablesen, ohne erst bestimmen zu müssen, mit welchem Teilchen man es jeweils zu tun hat. Das Kalorimeter von H1 war aus Blei- und Stahlplatten aufgebaut und ermöglichte insbesondere eine genaue Vermessung der Elektronen. ZEUS und H1 betrieben zwar ein ähnliches Forschungsprogramm, unterscheiden sich aber in Aufbau und Vorgehensweise. Für die Messungen hat das den großen Vorteil, dass sie von zwei unabhängigen Teams durchgeführt wurden und ZEUS und H1 sich auf diese Weise gegenseitig kontrollierten.

Quarkbrei im Proton

Natürlich teilen sich ZEUS und H1 dann auch die Lorbeeren. Das sind einige, doch die Entschlüsselung des Protoninnenlebens bildet den Hauptertrag. Als HERA 1992 an den Start ging, wusste man relativ wenig darüber. Neben den drei Quarks vermutete man noch einige wenige Quark-Antiquark-Paare und Gluonen im Proton. Umso überraschender war dann, was ZEUS und H1 fanden: Im Proton hat man es eher mit einem Brei zu tun, in dem unablässig Quark-Antiquark-Paare sowie Gluonen erzeugt und wieder vernichtet werden. Vorherige Experimente konnten dieses Gewimmel nicht sehen, weil sie mit zu wenig Energie in das Proton schauten. Sie glichen eher einer Lupe, erst HERA zeigte den Blick durchs Mikroskop.

Auf ihren Lorbeeren ruhten sich ZEUS und H1 nicht aus, sondern sammelten bis zum letzten Betriebstag Daten, deren Auswertung die beteiligten Wissenschaftler noch einige Zeit beschäftigen wird. Vielleicht enthalten sie noch die eine oder andere Überraschung.



Eines der herausragenden Ergebnisse von HERA bestand darin, die innere Struktur des Protons aufzuklären. Überträgt das zwischen Elektron (e) und Proton (p) ausgetauschte Lichtteilchen (Photon γ) nur wenig Impuls (oben), so „sieht“ das Photon nur die Hauptbestandteile des Protons, die einzelnen Valenzquarks. Bei höherem Impulsübertrag (unten) wird die Auflösung des HERA-Mikroskops größer – das hochenergetische Photon enthüllt die brodelnde „Suppe“ von Quarks, Antiquarks und Gluonen im Proton.

CMS – Der Eiffelturm am CERN

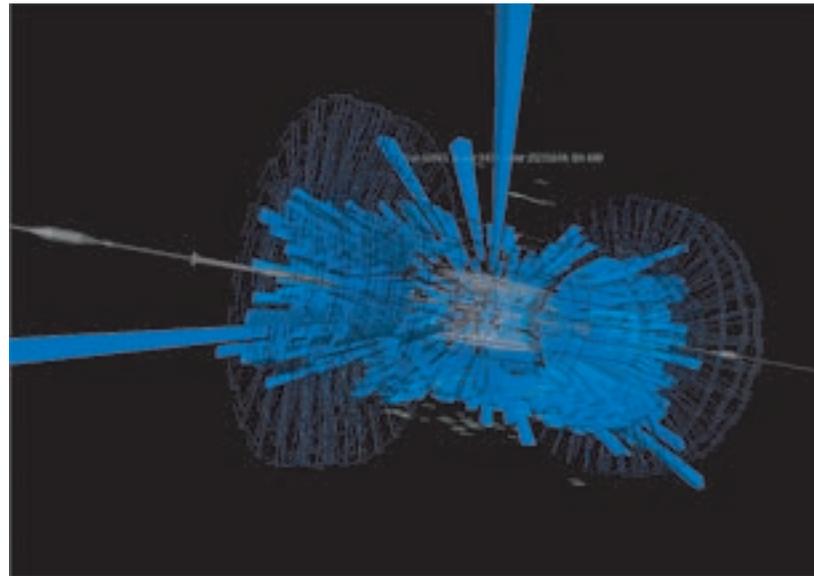
„Ohne Verbundforschung gäbe es uns nicht.“ Ein Statement, das man in der Hochenergiephysik häufig zu hören bekommt, und auch Prof. Dr. Thomas Hebbeker, Sprecher des Forschungsschwerpunkts CMS, macht da keine Ausnahme. Zwar liefern die drei beteiligten deutschen Universitäten – Aachen, Karlsruhe und Hamburg – „nur“ einen Beitrag von etwa fünf Prozent zum CMS-Detektor am LHC, aber erstens sind 38 Länder mit 174 Instituten an ihm beteiligt und zweitens könnte eine Universität ohne die Verbundforschung nicht einmal daran denken, an einem mehrere Hundert Millionen Euro teuren Großprojekt wie dem CMS mitzuarbeiten. „Alle Entwicklungen von unserer Seite wurden durch das BMBF gefördert“, so der Aachener Physiker Hebbeker.

Physiker am CERN haben den Vorteil, immer in Superlativen schwelgen zu können. So ist im CMS der weltweit größte supraleitende Magnet seiner Art verbaut. Die Energie, die in seinem Magnetfeld steckt, würde ausreichen, um 18 Tonnen Gold zu schmelzen. Der Typ der Magnetspule – ein Solenoid, also eine zylinderförmige Spule – liefert den dritten Buchstaben von CMS, die beiden anderen stehen für „Compact“ und „Muon“ (engl. für Myon). Kompakt deshalb, weil der Detektor mit 12500 Tonnen mehr wiegt als der Eiffelturm, dafür aber ein relativ kleines Volumen hat – hier wurde kein Platz verschwendet. Und die Registrierung von Myonen ist eine der Hauptaufgaben des Detektors. Wenn man Glück hat, verrät sich das Higgs-Boson, das der LHC ja sichtbar machen soll, durch einen Zerfall in vier Myonen, wenn man Pech hat, wird's ein bisschen komplizierter – das hängt von der Masse des Higgs-Bosons ab. Auch andere interessante Prozesse, die man mit dem LHC studieren möchte, hinterlassen Myonen, weshalb man bei CMS das Augenmerk in erster Linie auf diese Teilchen gerichtet hat.

Teilchenspuren in extremer Genauigkeit

Die deutschen Arbeitsgruppen sind sowohl am Detektorbau als auch an der Datenanalyse beteiligt. So gehen etwa 20 Prozent des Silizium-Streifendetektors auf ihr Konto. Auch in den Endkappen von CMS sitzen Detektoren, damit auch ja kein Teilchen entwischt – eine dieser Endkappen wurde in Aachen zusammengebaut.

Der Streifendetektor ist der innerste von CMS und zeichnet die Bahnen geladener Teilchen auf, die durch das Magnetfeld gekrümmt werden. Er besteht aus feinen Siliziumstreifen, die typischerweise im Abstand von 0,05 Millimetern angeordnet sind und zusammen eine aktive Detektorfläche von 210 Quadratmetern ergeben – ein weiterer Superlativ, denn damit ist dieser Detektor der größte seiner Art. Fliegt ein Teilchen durch einen solchen Streifen, werden in dem Halbleiter Elektron-Loch-Paare erzeugt, die von der Ausleseelektronik registriert werden. Alle durchflogenen Streifen ergeben zusammen die Spur des Teilchens, die sich mit einer einmaligen Ortsauflösung von 0,02 Millimetern registrieren lässt – „die Kombination aus Detektorgröße und Genauigkeit ist ein absolutes Alleinstellungsmerkmal von CMS“, wie Thomas Hebbeker hervorhebt.



Eine der ersten Aufnahmen mit CMS zeigt die Teilchenspuren, die im Kalorimeter und in den Myonkammern registriert wurden, nachdem der Strahl auf den Detektor gelenkt wurde.



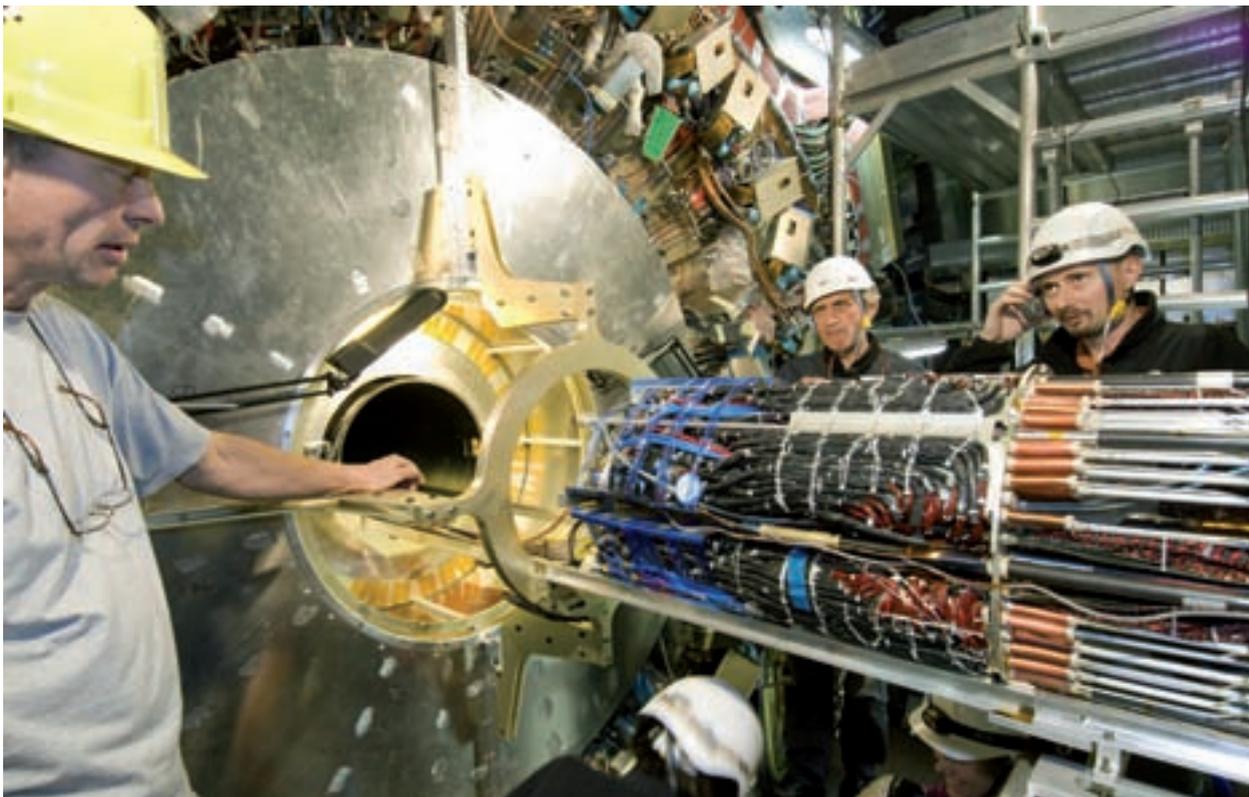
Mehrere deutsche Forschungsgruppen bauten wichtige Komponenten des Spurdetektors von CMS.

ATLAS – Eine Digitalkamera für 40 Millionen Bilder pro Sekunde – mit 80 Megapixeln!

Der ATLAS-Detektor am CERN ist der große Bruder des CMS und setzt den Reigen der Superlative fort: Mit einer Länge von 46 Metern und einem Durchmesser von 25 Metern ist er der größte bislang gebaute Detektor der Hochenergiephysik. Seine To-do-Liste gleicht der von CMS, denn auch ATLAS widmet sich den Schlüsselfragen der Elementarteilchenphysik, also unter anderem der Suche nach dem Higgs-Boson. Nur wenn dieses Teilchen so schwer ist, dass es in zwei so genannte Vektorbosonen und diese wiederum jeweils in zwei Leptonen zerfallen, wird es relativ leicht und schnell zu finden sein. Prof. Dr. Norbert Wermes, Sprecher des FSP-101 ATLAS, rechnet jedoch damit, dass uns die Natur nicht diesen Gefallen tut: „Leider wird es wohl ein leichteres Teilchen sein – wenn es existiert.“ Dann aber gestaltet sich die Suche nach dem Higgs-Boson deutlich komplizierter, weil man nach selteneren Zerfällen des Higgs-Bosons Ausschau halten muss, die durch viele andere Prozesse überdeckt werden: Alle 25 Nanosekunden – eine Nanosekunde ist eine

milliardstel Sekunde – entstehen beim LHC etwa 1.600 nachzuweisende Teilchen, also fast hundert Milliarden pro Sekunde. Allerdings kennt man im Rahmen des Standardmodells alle Eigenschaften des Higgs-Bosons bis auf seine Masse, sodass man in Simulationen vorab zeigen konnte, dass ATLAS es finden muss – vorausgesetzt, es ist nicht ungewöhnlich leicht oder schwer und es existiert.

Der innere Detektor von ATLAS hat – ganz analog zu CMS – die Aufgabe, die Bahnkurven der bei der Kollision produzierten elektrisch geladenen Teilchen und damit ihren Entstehungsort in einem Magnetfeld sehr genau zu vermessen: Nur so kann ermittelt werden, welche Prozesse nach der Kollision stattgefunden haben. Einige der daran beteiligten Teilchen, etwa das schwere Bottom-Quark aus der dritten Quark-Generation, zerfallen bereits nach 1,5 billionstel Sekunden wieder und legen dabei nur wenige Millimeter Strecke zurück. Um bei der Vielzahl der Spuren ein solches Quark aus

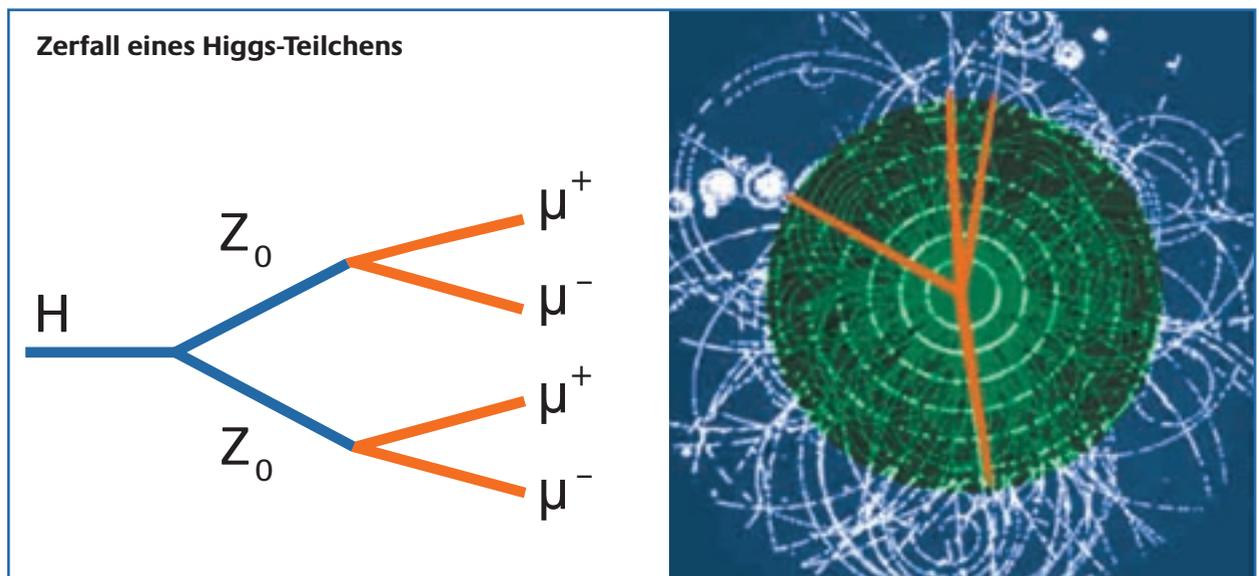


Im Juni 2007 wurde der Pixeldetektor von ATLAS installiert.

dem Teilchengewimmel herausfischen zu können, muss der Detektor eine extrem gute Ortsauflösung haben – „das stellte eine enorme Herausforderung bei der Entwicklung dar“, so Norbert Wermes, „und war für eine Gruppe allein gar nicht zu schaffen. Für ein solches Projekt kann man nichts von der Stange nehmen, da betritt man technologisches Neuland.“ Die vier Universitäten Bonn, Dortmund, Siegen und Wuppertal bildeten deshalb eine Allianz, um den inneren Spurdetektor von ATLAS im Rahmen der Verbundforschung zu bauen. Ab 1994 fanden dazu Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Labor statt, ab 2002 wurde gebaut. Der Detektor besteht aus etwa 80 Millionen winziger Pixel, die jeweils direkt mit einer empfindlichen und sehr schnellen Ausleseelektronik verbunden sind. Der wesentliche Unterschied zu einer Digitalkamera, die ebenfalls mehrere Millionen Pixel besitzt, liegt vor allem in der Aufnahmegeschwindigkeit von 40 Millionen Kollisionen pro Sekunde. Jeder Treffer eines

Pixels durch ein Teilchen wird von der Elektronik registriert und über mehrere Stufen an den Computer weitergeleitet. Der rechnet dann aus der Datenflut die Spur aus – bis auf 0,014 Millimeter genau.

Bis auf wenige Zentimeter rücken die Pixel an den Kollisionspunkt der Teilchenpakete bei LHC heran. Sie sind daher einer enormen Strahlenbelastung ausgesetzt. Aktuelle Projekte der Verbundforschung beschäftigen sich deshalb mit der Frage, wie man die Strahlenfestigkeit des Detektors erhöhen kann. „Gedanklich sind wir außerdem schon beim Super-LHC, der geplanten Ausbaustufe des LHC. Die Strahlenbelastung der technischen Einrichtungen wird dann nochmals um das Zehnfache zunehmen, sodass wir jetzt untersuchen müssen: Wie muss ein neuer Innenteil des Detektors entwickelt werden, damit er das aushält?“ Typisch für die Verbundforschung in der Hochenergiephysik: Sie denkt in langen Zeiträumen.



Ist das Higgs-Boson schwer genug, kann es in vier Leptonen (beispielsweise in zwei Myon-Antimyon-Paare, μ^\pm) zerfallen – entsprechende Ereignisse wären in diesem Fall relativ einfach von ATLAS zu identifizieren.

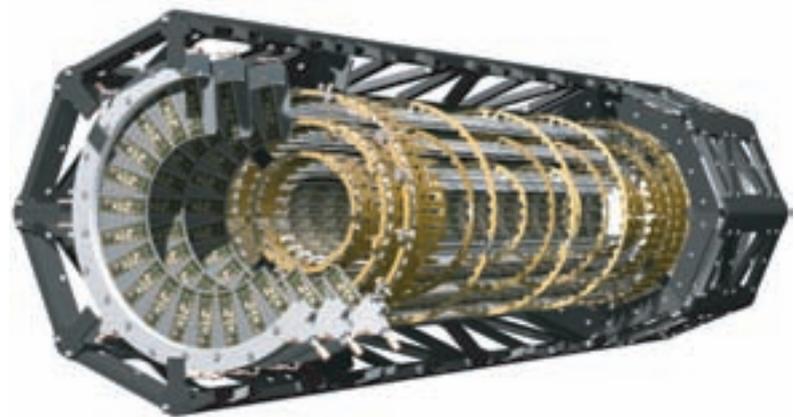
Rechnen für neue Physik

„Da ist das Ding!“, schrie Oliver Kahn immer, wenn er wieder mal einen Pokal in die Höhe stemmte. Auf ähnliche Emotionen hoffen die Teilchenphysiker am LHC, wenn sie – endlich – die Entdeckung des Higgs-Bosons verkünden und feiern dürfen. Dann wäre das Teilchensortiment des Standardmodells komplett, mehrere Jahrzehnte nach der Formulierung dieses Theoriegebäudes. Doch die Higgs-Suche ist nicht die einzige Aufgabe des LHC, genauso wenig wie das Standardmodell das Ende der Teilchenphysik ist. Vielmehr warten jenseits des Standardmodells neue faszinierende Herausforderungen. Gibt es bisher unbekannte Elementarteilchen, beispielsweise supersymmetrische Teilchen, die auch eine Erklärung für die Dunkle Materie im Universum liefern könnten? Für die Existenz solcher Teilchen sprechen gute Gründe aus der Elementarteilchentheorie, bisher konnten sie aber nicht nachgewiesen werden, da supersymmetrische Teilchen – wenn

es sie gibt – sehr hohe Massen haben. Der LHC erschließt jedoch einen Energiebereich, in dem man fündig werden könnte. Eine weitere offene Frage: Entspringen die bekannten Kräfte einer einzigen Universalwechselwirkung, die sogar die sperrige Gravitation, für die es immer noch keine Quantentheorie gibt, mit einschließt? Und gibt es vielleicht weitere Raumdimensionen? Das ist keine Spinnerei, sondern die Konsequenz einiger Gravitationstheorien, die von Theoretikern diskutiert werden und am LHC prinzipiell getestet werden können. Um in den experimentellen Daten Signaturen sogenannter „neuer Physik“ zu finden, sind allerdings schwierige und umfangreiche theoretische Anstrengungen und Rechnungen erforderlich. Im BMBF-Theorie-Verbund werden deshalb begleitende theoretische Untersuchungen an neun Universitäten zu den Experimenten an den Großgeräten der Teilchenphysik gefördert.

Spin-off

Beim Bau des Pixeldetektors musste in vielen Bereichen technisches Neuland betreten werden. Davon muss nicht nur die Teilchenphysik, sondern es können beispielsweise auch medizinische Anwendungen profitieren. Vom Pixeldetektor bei ATLAS zum digitalen Röntgensensor ist es nur ein kleiner Schritt. Statt Teilchen werden in diesem Fall Röntgenphotonen detektiert und einzeln gezählt, quasi doppelt digital: digitale Pixelzellen und digitale Aufnahmetechnik. Das digitale Röntgenbild ist frei von Über- und Unterbelichtung, hat hervorragende Kontrasteigenschaften und entsteht in Echtzeit. So wurde eine neue Methodik in der Röntgenbildgebung in Gang gesetzt, die schon heute in der Industrie für eine neue Generation von Röntgengeräten in der Entwicklung ist.



Das dreidimensionale Modell zeigt den Aufbau des Pixeldetektors aus drei tonnenförmigen Lagen um die Strahlachse und aus drei Scheiben in beiden Richtungen entlang der Strahlachse.

Ein Wissenschaftler arbeitet im Inneren des ATLAS-Detektors. ►



OPERA – Die Suche nach dem Knick

Inzwischen können Neutrinos experimentell nachgewiesen werden, dürfen aber keinesfalls zu den Akten gelegt werden, ganz im Gegenteil. Im Standardmodell werden die Neutrinos als masselos behandelt, die Natur scheint hier jedoch der Theorie einen Strich durch die Rechnung zu machen. Für die direkte Messung einer Neutrinomasse kann bisher zwar nur eine Obergrenze angegeben werden, indirekt haben sich die Neutrinos jedoch schon recht eindeutig verraten: Die drei Neutrinoarten wandeln sich nämlich ineinander um, und das geht nur, wenn zwischen ihnen eine Massendifferenz besteht – also müssen Neutrinos auch eine Masse haben.

Bereits 1968 lieferte das Homestake-Experiment in den USA zum Nachweis von Elektron-Neutrinos aus der Sonne einen ersten Hinweis auf Neutrinooszillationen, denn man registrierte weniger Neutrinos als erwartet: Hatte sich ein Teil von ihnen unterwegs umgewandelt? Endgültig akzeptiert wurden die Neutrinooszillationen aber erst 1998 durch die Ergebnisse des japanischen Superkamiokande-Detektors, der auch messen konnte, aus welcher Richtung die Neutrinos stammen, und nachwies, dass tatsächlich gut die Hälfte der Elektron-Neutrinos auf dem Weg von der Sonne zur Erde verschwindet.

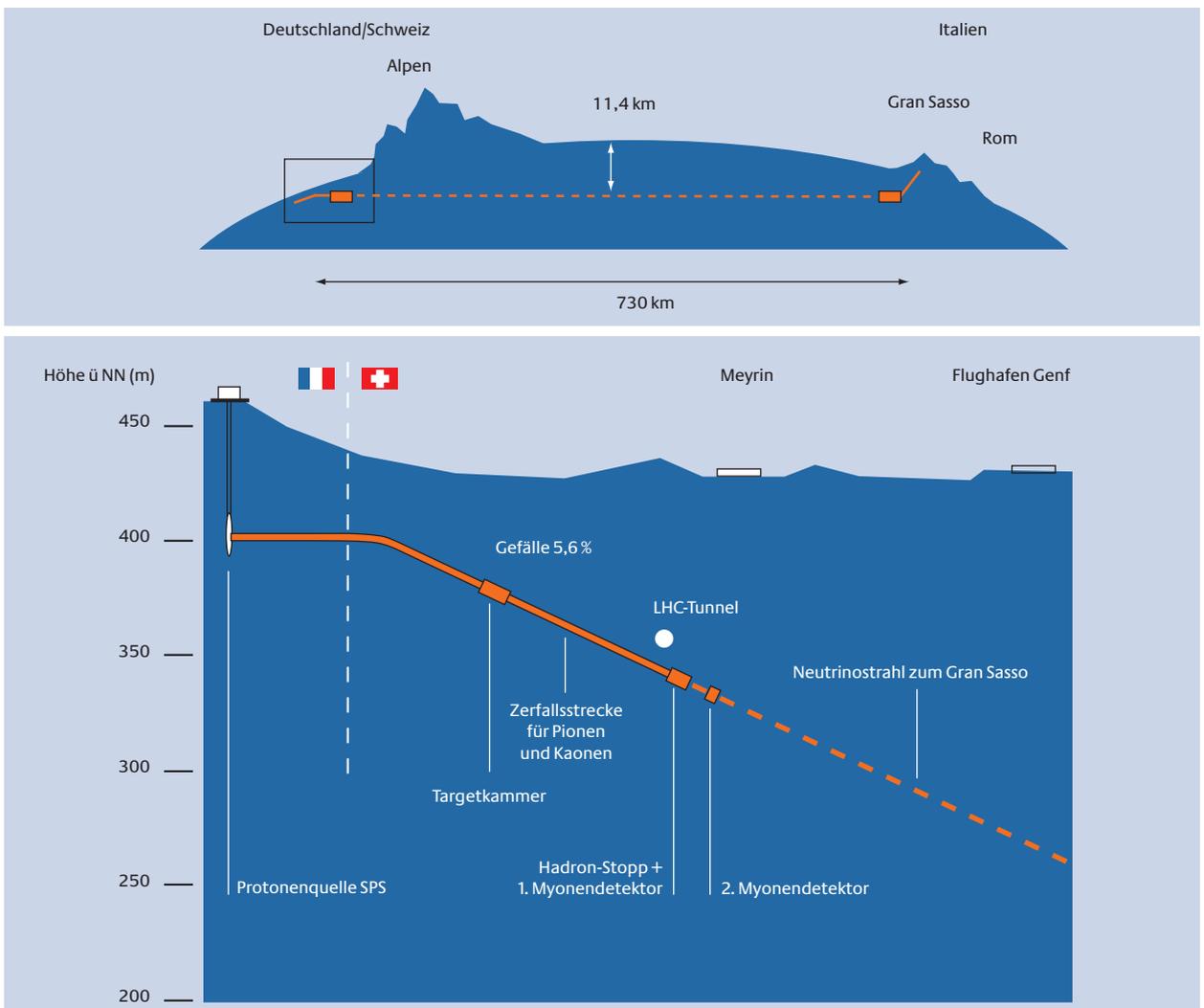
Was aber auch Superkamiokande nicht zeigte, war das Auftauchen einer anderen Neutrinosorte anstelle der verschwundenen Elektron-Neutrinos. Dieser Aufgabe hat sich OPERA gewidmet, eines der wichtigsten aktuellen Neutrinoexperimente. Die Neutrinos stammen hier nicht aus der Sonne oder der Erdatmosphäre, sondern werden vom CERN geliefert und sind fast ausschließlich Myon-Neutrinos – die winzigen Beimischungen der anderen Neutrinosorten sind jedoch bekannt. Dieser Neutrinostrahl trifft, ohne unterwegs gestört zu werden, auf den ca. 730 Kilometer entfernten Neutrinodetektor, dem Herzstück des Experiments, im italienischen Gran-Sasso-Untergrundlabor. Wenn Neutrinos oszillieren, dann sollte der Strahl nun auch Tau-Neutrinos enthalten, und genau die soll OPERA nachweisen. OPERA ist im Gegensatz zu den oben genannten Experimenten kein Defizitexperiment, das nachschaut, wie viele Neutrinos einer Generation fehlen, sondern ein „Appearance“-Experiment: Es soll beobachtet werden, ob Tau-Neutrinos auftauchen.

Der Nachweis des Tau-Neutrinos läuft über das Tau-Lepton (dem „Elektron der dritten Elementarteilchen-Generation“), das von ihm im Detektor erzeugt wird. Das kommt allerdings nur 600 Mikrometer weit, bevor es in ein Myon zerfällt. Man muss im Endeffekt nach ganz speziellen Myon-Spuren suchen, nämlich nach jenen, die einen kleinen Knick in der Nähe des Zerfallsortes haben – das sind die richtigen. Entsprechend genau, in Submillimeter-Granularität, muss der Detektor die Myonspuren räumlich auflösen können – und das bei einem Volumen von 2000 Kubikmetern! Er macht das mithilfe von Photoplatten, die zwischen ein Millimeter dicken Bleiplatten angeordnet sind. Aus 56 solcher Photo-Bleiplatten-Kombinationen besteht ein Sensormodul; 155.000 solcher Sensormodule bilden das Ziel für die Neutrinos aus Genf, das Target des OPERA-Detektors. Gleichzeitig enthält der Detektor elektronische Spurdetektoren, die den Zerfallsort in Echtzeit sehr genau ermitteln. Abschließend entnimmt ein Roboter vollautomatisch die betroffenen Sensormodule des Targets, etwa 30 pro Tag, deren Photoplatten dann entwickelt und zur mikroskopischen Auswertung an eine ganze Reihe von Instituten verschickt werden. Hinter dem Target folgt noch ein Myon-Spektrometer, das aus 15.000 Driftröhren besteht und u. a. die Ladung der Myonen misst.



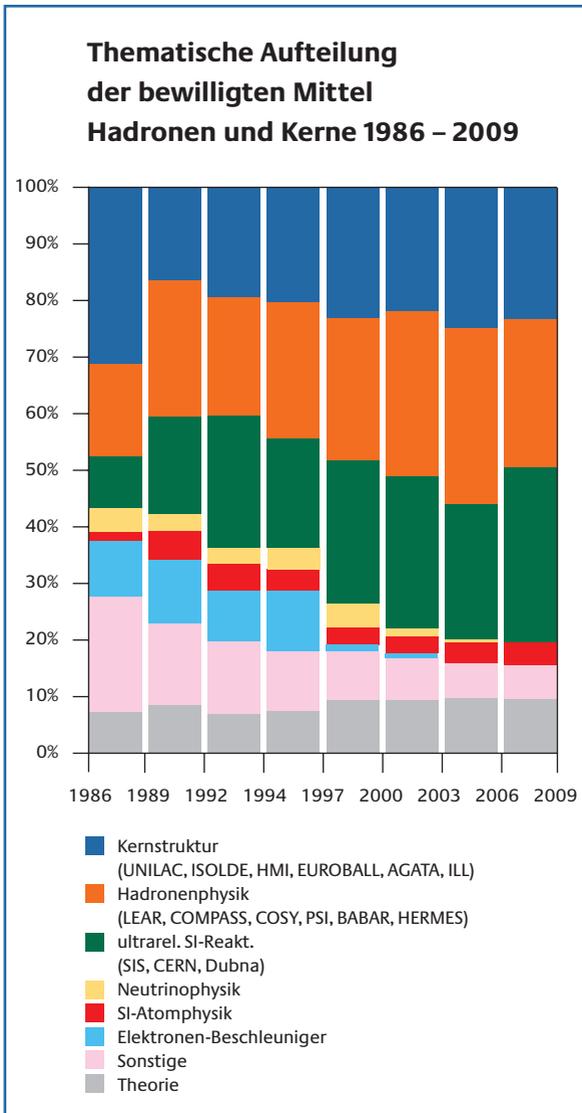
Ein einzelner Sensor des OPERA-Detektors, dem Kernstück des Neutrinoexperimentes, enthält 56 Blei- und 57 Photoplatten. Der gesamte Detektor besteht aus 155.000 solcher Sensoren.

Zwei deutsche Universitäten sind im Rahmen der Verbundforschung am Aufbau und Betrieb des OPERA-Experimentes sowie der Suche nach den umgewandelten Tau-Neutrinos beteiligt. An der Universität Hamburg wurde das Myon-Spektrometer gebaut, während sich die Universität Münster verantwortlich um die Herstellung und Qualitätskontrolle der über 10 Millionen Bleiplatten in einem deutschen Industriebetrieb kümmerte. Sie alle hoffen, dass in den fünf Jahren Laufzeit von OPERA etwa zehn Tau-Neutrinos gesehen werden und somit die Entstehung von Tau-Neutrinos bewiesen wird – Neutrinos sind allerdings immer für eine Überraschung gut.



Im CERN wird der Neutrino-Strahl erzeugt, der anschließend über 700 km weit zum Gran-Sasso-Labor unterwegs ist, wo der OPERA-Detektor steht. Da die Neutrinos mit der umgebenden Materie fast nicht in Wechselwirkung treten, müssen sie nicht in Rohren oder Leitungen geführt werden – sie fliegen ganz einfach durch die Erdkruste hindurch, bis sie auf den Detektor im Gran-Sasso-Massiv treffen.

Supernova im Labor



Vor gut einhundert Jahren machte der britische Physiker und spätere Nobelpreisträger Ernest Rutherford die bahnbrechende Entdeckung, dass Atome im Wesentlichen aus leerem Raum bestehen: Fast die ganze Masse ist im kompakten Kern konzentriert. Einige Jahre später entdeckte ebenfalls Rutherford das Proton, einen der Kernbausteine. Der andere, das Neutron, wurde von ihm bereits vermutet, aber erst in den 1930er-Jahren nachgewiesen. Die Anzahl von Protonen und Neutronen im Kern bestimmt, um welches Isotop es sich bei einem Atom handelt. Ob Wasserstoff, Chlor, Quecksilber, Sauerstoff, Stickstoff, Eisen, Gold, Blei oder Silizium: Das charakteristische Merkmal eines Elements ist die Zusammensetzung seines Atomkerns.

Die Protonen und Neutronen im Kern werden von der so genannten „Starken Kraft“ zusammengehalten. Alle Elementarteilchen, die dieser fundamentalen Wechselwirkung unterliegen, bezeichnet man als Hadronen. Sie bestehen ihrerseits aus noch kleineren Teilchen, den Quarks. Von ihnen nimmt man an, dass sie nicht weiter zerlegt werden können, dass sie also wirklich elementar sind.

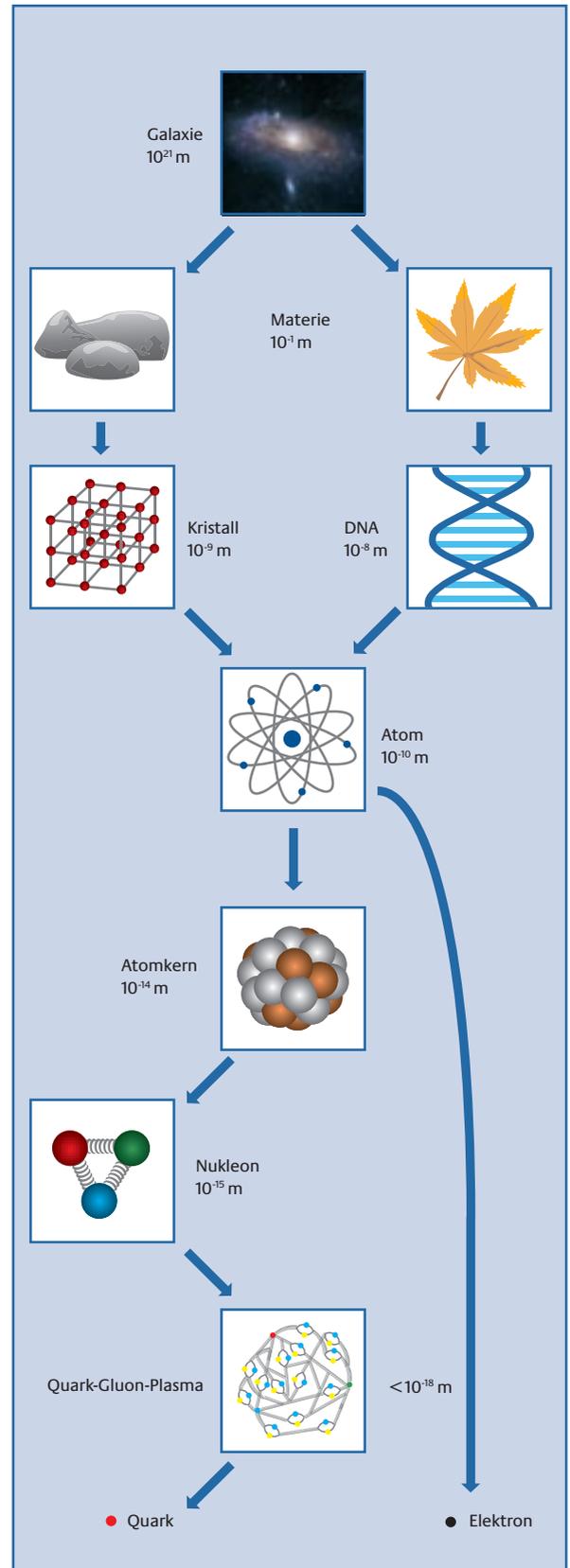
Die Elemente, die man in der Natur findet, wurden in der frühen Phase des Universums, in Sternen und in vergangenen Supernova-Explosionen erzeugt. „Das Spannende an der Kernphysik“, so Prof. Dr. Horst Lenske, Vorsitzender des Komitees für Hadronen- und Kernphysik in Deutschland (KHuK), „ist die Verbindung zur kosmischen Dimension, die sie schafft, über viele Skalen hinweg vom Kleinsten zum Größten. Letzten Endes ist jeder Mensch nichts anderes als Sternenstaub.“

Hadronen und Kerne machen 99,9% der sichtbaren Masse des Universums aus. Zu verstehen, weshalb das so ist und wie die Starke Kraft die Materie dominiert, ist allein wegen dieser Zahl von größtem grundsätzlichem Interesse. „Trotzdem“, berichtet Horst Lenske, „war die Kernstrukturphysik vor 15 Jahren mehr oder weniger abgeschlossen. Aber dann wurden neue Atomkerne an der GSI entdeckt, die sonst nur in Supernovae vorkommen. Das hat das Gebiet enorm vorangebracht.“

Hadronen- und Kernphysiker verstehen sich deshalb als Mittler zwischen Elementarteilchenphysik und Astronomie, die sich mit den Grundlagen unseres physikalischen Weltbildes beschäftigen: Welche Eigenschaften hatte die Materie kurz nach dem Urknall? Wie bildeten sich daraus die Hadronen? Wie verhält sich Kernmaterie unter extremen Bedingungen, z. B. in Neutronensternen? Gibt es gluonische und andere exotische hadronische Zustände? Welche Kernreaktionen sind für die Nukleosynthese im Kosmos und in den Sternen wichtig? Wie treten Antiprotonen mit Kernmaterie in Wechselwirkung?

Das ist nur ein kleiner Ausschnitt aus der Forschungsagenda der Hadronen- und Kernphysik. Sie beflügelt die Fantasie der Wissenschaftler, sich neue innovative Instrumente für die Großgeräte auszudenken. Und sie dient den Forschungszentren als Richtschnur für ihre weitere Entwicklung. Ende der 1990er-Jahre wurde deshalb an der GSI die Idee zu FAIR geboren, einem neuen Beschleunigerzentrum für die Forschung mit Ionen- und Antiprotonenstrahlen. „FAIR“, so Prof. Dr. Joachim Stroth, einer der leitenden Wissenschaftler des CBM-Experiments bei FAIR, „ist die komplementäre Anlage zu allem, was in der Astrophysik läuft. Und es ergänzt das CERN: Während CERN höchste Energien produziert, schaut FAIR über andere Grenzen hinweg: Es werden sehr hohe Materiedichten erzeugt.“ Die Kombination aus der bisherigen Schwerionenforschung und der neuen Komponente Antiprotonenforschung macht FAIR zu einer Einrichtung mit einem enorm breiten wissenschaftlichen Themenspektrum.

Die uns umgebende Materie erweist sich als eine Hierarchie von zusammengesetzten Systemen über 40 Größenordnungen hinweg – von den Galaxien bis zu den elementaren Bausteinen, den Quarks und Elektronen. Unterschiedliche Kräfte bestimmen den Zusammenhalt der verschiedenen Hierarchiestufen. Im Bereich der Atomkerne, Nukleonen und des Quark-Gluon-Plasmas wirkt die Starke Kraft. ▶





Der Krebsnebel, hier aufgenommen mit dem FORS-Instrument am Very Large Telescope, ist der Überrest einer Supernova. Die schwersten Elemente bis zum Uran werden in solchen gewaltigen Sternexplosionen gebildet. Im Labor auf der Erde versucht man, die dabei ablaufenden Kernreaktionen nachzuvollziehen.



Das Küblersynchrotron COSY beim Forschungszentrum Jülich besteht aus einem Synchrotron, in dem Protonen oder Deuteronen beschleunigt werden, einem Speicherring und mehreren Experimentiereinrichtungen für Untersuchungen im Bereich der Hadronenphysik. COSY zeichnet sich vor allem durch die so genannte Strahlkühlung aus, bei der die Abweichung der Teilchen von ihrer vorgegebenen Bahn durch Elektronen- bzw. stochastische Kühlung reduziert wird.

Die Anwendung im Blick

Die Hadronen- und Kernphysik versteht sich aber auch als Bindeglied zwischen Grundlagenforschung und Anwendung. Mit denselben Geräten, an denen die Nukleosynthese in Sternen nachempfunden wird, betreibt man Forschung im Bereich der Materialwissenschaften: Die schweren Ionen der GSI sind beispielsweise hervorragend geeignet, Materialoberflächen zu untersuchen. Auch in der Biophysik und Medizin kommen Nuklearmethoden immer häufiger zum Einsatz, und zwar sowohl in der Forschung als auch in der Therapie. So wurde an der GSI die seit über zehn Jahren erfolgreich angewandte Intensitäts-Modulierte Ionen-Therapie, kurz IMPT (engl. Intensity Modulated Particle Therapy), zur Behandlung von Krebs-Tumoren entwickelt.

Das Beispiel Biophysik zeigt, wie stark sich die Verbundforschung an Großgeräten auf Universitäten und andere Forschungseinrichtungen auswirken kann. Die GSI arbeitet seit vielen Jahren auf dem Gebiet der Tumortherapie eng mit dem Deutschen Krebsforschungszentrum (DKFZ) in Heidelberg zusammen. Daraus ergab sich die Partnerschaft der GSI für das Pilotprojekt einer Ionenstrahl-Therapieanlage, die an der Radiologischen Klinik der Universität Heidelberg gebaut wurde und an der ab Mitte 2009 Patienten mit schweren Ionen behandelt werden. Die Heidelberger Ionenstrahl-Therapie (HIT) ist die erste Anlage ihrer Art in Europa.

Grundlagenforschung zu zentralen Fragen unseres Universums und gleichzeitig Motor für die Entwicklung wichtiger Anwendungen – spannender kann Wissenschaft kaum sein.

FAIR – Einzigartiger Doppelring

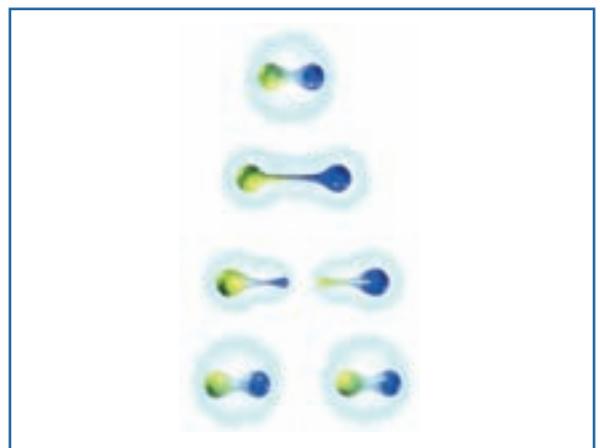
Die bis 2015 beim GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt entstehende neue Teilchenbeschleunigeranlage FAIR (Facility for Anti-proton and Ion Research) löst bei Wissenschaftlern – nicht nur Hadronen- und Kernphysikern – wahre Begeisterungstürme aus. Sie wird eine der größten Beschleunigeranlagen in Europa sein und hinsichtlich der Breite der Forschung einzigartig auf der Welt. „Kein Wunder“, schwärmt Prof. Dr. Karlheinz Langanke, der für die Forschung zuständige Direktor der GSI, „dass zahlreiche deutsche Wissenschaftler, die in den letzten Jahren im Ausland tätig waren, zurückgeholt werden konnten, um an diesem Vorhaben mitzuwirken.“

Das Herzstück der Anlage wird von einem großen Doppelringbeschleuniger mit 1100 Metern Umfang gebildet. Daran schließt sich ein komplexes System von Speicherringen und Experimentierstationen an, während die bereits existierenden GSI-Beschleuniger keineswegs ausrangiert werden, sondern als Vorbeschleuniger dienen.

Der neue Beschleunigerkomplex FAIR wird Ionen- und Antiprotonenstrahlen in bisher unerreichter Intensität und Qualität liefern. Eine weitere Besonderheit ist, dass die Anlage mit parallelen Strahlen betrieben werden kann: Quasi gleichzeitig können Ionenstrahlen von Wasserstoff (Protonen) bis hin zu Uran sowie Antiprotonen beschleunigt werden. Um diese Herausforderungen zu meistern, werden allein während des Baus 2500 Wissenschaftler weltweit theoretische und praktische Beiträge liefern. „Bis Ende 2008 wurden bereits 2000 Proposals zu FAIR geschrieben“, stellt Prof. Dr. Joachim Stroth, einer der leitenden Wissenschaftler des CBM-Experiments, fest. „Eine besonders erfreuliche Tatsache ist“, so Langanke, „dass Forschung und damit indirekt auch Lehre an den Universitäten sehr gefördert werden. Und zwar innerhalb der nächsten 20 Jahre! In Deutschland werden voraussichtlich 30 neue Professuren, u. a. zur Beschleunigerphysik, eingerichtet, und auch an einigen Universitäten im Ausland ist die Schaffung neuer Professuren im Zusammenhang mit FAIR geplant.“

Fakten zu FAIR:

- wurde 2003 als größtes deutsches Zukunftsprojekt im Bereich der Kernphysik genehmigt
- 14 Unterzeichnerstaaten des FAIR Memorandum of Understanding (vor allem aus Europa); daneben sogenannte Observer States: USA, Japan
- ca. 2500 Wissenschaftler aus 44 Nationen an Planung und späterer Nutzung beteiligt
- Erste Experimente sind für 2014/2015 geplant, der Vollbetrieb soll 2016 aufgenommen werden.
- Für den Bau der Startversion sind 940 Mio. EUR veranschlagt, für den Vollbetrieb wird mit Kosten von 120 Mio. EUR pro Jahr gerechnet.
- 75% der Mittel für FAIR kommen aus verschiedenen deutschen Fördertöpfen.
- Die restlichen Kosten übernehmen die übrigen Unterzeichnerstaaten.



In der Natur treten Quarks nicht isoliert auf, sondern immer als Paare oder Dreierkombinationen. Doch welche Kombinationen von Quarks sind möglich? Wie halten sie zusammen? Über 300 Physiker aus 15 Ländern erhoffen sich durch das PANDA-Experiment neue Antworten auf diese weitreichenden Fragestellungen.

Die Faszination des Vorhabens wird erst recht deutlich, wenn man sich die geplanten Experimente anschaut: So wird die Untersuchung von Teilchenstrahlen radioaktiver Kerne dazu beitragen, die Entstehung der chemischen Elemente im Universum sowie die Dynamik explosiver astrophysikalischer Objekte wie Supernovae besser zu verstehen. Mit dem PANDA-Experiment (antiProton ANnihilation at Darmstadt) kann untersucht werden, wie die Starke Kraft die elementaren Materiebausteine, die Quarks, zusammenhält. Den Sprung von den kleinsten zu den größten Dimensionen will man mit dem CBM-Experiment (Compressed Baryonic Matter) wagen, soll es doch, obwohl mit hoch verdichteten Kernbausteinen in einem irdischen Laboratorium experimentiert wird, die Frage klären helfen, wie die Bestandteile der Materie nach dem Urknall entstanden.

Was für die gesamte Hadronen- und Kernphysik gilt, trifft auf FAIR in besonderem Maße zu: Das Spektrum der Themen, die wissenschaftlich er-

schlossen werden können, ist außerordentlich breit. So werden, auch durch den zusätzlichen Einsatz von Hochleistungslasern, die Grundlagen des vierten Aggregatzustandes, des Plasmas, untersucht werden können, und der nicht nur für Atomphysiker spannenden Frage, ob es eine Antiwelt gibt, wird man mit Experimenten zu fundamentalen Symmetrien nachgehen.

Nicht zuletzt strahlt FAIR sogar auf die Wirtschaft aus. „Eine Anlage dieser Art stellt ganz neue Herausforderungen an die Instrumentierung“, betont Joachim Stroth, „und dadurch wird die Zusammenarbeit mit der Industrie gefördert: So werden beispielsweise besonders hochauflösende Pixel-detektoren der Art, wie sie in Kameras zu finden sind, zukünftig in Detektoren bei FAIR eingesetzt.“

FAIR ist somit das Paradebeispiel für Forschung im Verbund.



Mit dem 120 Meter langen Linearbeschleuniger UNILAC des GSI Helmholtzzentrums für Schwerionenforschung, mit dem Ionen auf maximal 20% der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden können, wurden erstmals die schweren Elemente Bohrium, Hassium, Meitnerium, Darmstadtium, Roentgenium und das bisher unbenannte Element 112 synthetisiert. Darüber hinaus dient der UNILAC als Injektor für das Synchrotron SIS18. Das Bild wurde während Wartungsarbeiten aufgenommen und zeigt das Innere eines Beschleuniger-Vakuumtanks.

ALICE – Eine ganz besondere Suppe: Quark-Gluon-Plasma

Ein erklärtes Ziel der Förderung innerhalb der Verbundforschung ist es, die deutsche Beteiligung an den großen, internationalen Kollaborationen und wissenschaftlichen Aktivitäten am CERN zu stärken. Im Bereich Hadronen- und Kernphysik wurde mit Blick auf die herausragenden Möglichkeiten, die der neue Large Hadron Collider (LHC) am CERN nach seiner Inbetriebnahme bieten wird, ein BMBF-Forschungsschwerpunkt (FSP) eingerichtet, der die Forschung am Detektor ALICE (A Large Ion Collider Experiment) unterstützt.

„Der FSP ermöglicht die koordinierte Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Arbeitsgruppen – jeweils etwa 20 Personen – an Universitäten und der GSI; ohne diese Zusammenarbeit wäre der Aufbau der komplizierten Geräte wie TRD und TPC Komponenten nicht möglich“, so Prof. Dr. Johanna Stachel, die das Projekt TRD (Transition Ray Detektor) leitet, „und das Gleiche gilt für die Analyse der Daten, die ebenfalls zwischen verschiedenen Arbeitsgruppen aufgeteilt werden muss.“



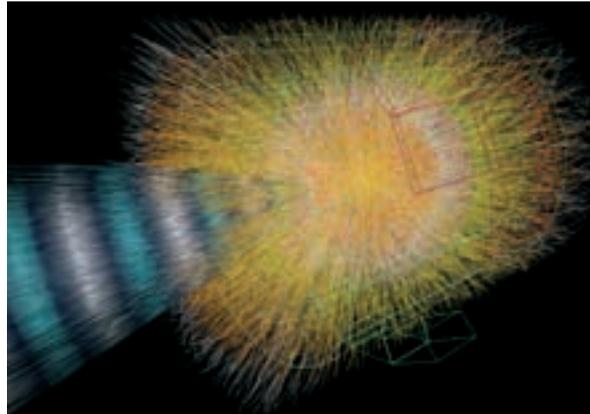
Die Time Projection Chamber (TPC) ist der Teil von ALICE, in dem hauptsächlich die Teilchenbahnen bestimmt werden. Die geladenen Teilchen ionisieren das TPC-Füllgas und erzeugen freie Elektronen, die über die angelegte Spannung „abgesaugt“ werden. Daraus lässt sich die Teilchenbahn rekonstruieren.

Mit ALICE soll ein Quark-Gluon-Plasma (QGP) erzeugt werden – ein äußerst heißes und komprimiertes Gemenge aus Quarks, den elementaren Bausteinen unserer Materie, und Gluonen, den „Klebstoffteilchen“, die die Wechselwirkung zwischen den Quarks vermitteln. Doch das Ziel ist nicht irgendein QGP, sondern es soll besonders langlebig sein, damit man seine Eigenschaften charakterisieren kann – zum ersten Mal in der Physikgeschichte. „Langlebig“ bedeutet, dass während der Lebensdauer des QGP das Licht eine Strecke von etwa 10 fm (Femtometern, $1 \text{ fm} = 10^{-18} \text{ m}$) zurücklegt – in bisherigen QGP-Experimenten erreichte man nur ein Zehntel dieser Lebensdauer. Die Energien am LHC reichen aus, um Kernmaterie (die aus Quarks und Gluonen aufgebaut ist) zu schmelzen, und zwar, indem Kerne des Elements Blei (mit 208 Nucleonen) beschleunigt und zum Zusammenstoß gebracht werden. Die Schmelze ist das QGP, aus dem sich beim Abkühlen Tausende von Zerfallsteilchen bilden. Die Spuren dieser Teilchen werden gemessen. „Eine der großen technischen Herausforderungen bei ALICE“, erläutert Johanna Stachel, „ist es, aus etwa 10.000 Zerfallsereignissen 100 relevante, vielversprechende Ereignisse herauszufiltern und zu analysieren, und das alles online innerhalb der Zeit, in der das QGP abkühlt.“ Aus Messungen am HERA bei DESY oder am RHIC in Brookhaven weiß man, dass besonders interessante Spuren die von Elektron-Positron-Paaren sind, die beim Zerfall von Charm-Quarks entstehen. Speziell für den Nachweis solcher Ereignisse ist der Übergangstrahlungsdetektor (TRD) ausgelegt.

Neben dem TRD ist Deutschland mit einem Anteil von 60% hauptverantwortlich für den Bau und Betrieb der Zeitprojektionskammer (Time Projection Chamber, TPC), die die Hauptlast bei der Spurerkennung der in den Kernkollisionen erzeugten geladenen Teilchen trägt. Für die gesamte Datenerfassung entscheidend ist die deutsche Arbeit am zentralen Triggersystem. Der Ist-Zeit-Trigger von ALICE hat Zugriff auf eine Computerfarm und soll bei einer Verarbeitungszeit von 100 Mikrosekunden pro Kollision die interessanten Ereignisse aus der riesigen Datenflut aussondern (sog. High Level Trigger). Für die Auswertung der Daten von ALICE und der anderen LHC-Experimente bedeutsam ist der Beitrag der Helmholtz-Zentren FZK und GSI zur Entwicklung einer nationalen e-Science-Infrastruktur. Dazu wird ein mehrere tausend Rechner umfas-

sendes so genanntes GRID aufgebaut, zu dem auch die beteiligten Universitäten Frankfurt, Heidelberg und Münster Hardware beisteuern.

Bei einem dermaßen vernetzten Projekt ist der Austausch zwischen den beteiligten Wissenschaftlern immens wichtig. „Man braucht Experten, die Einzelaspekte gut verstehen, die aber auch miteinander reden“, fasst Johanna Stachel zusammen. Der FSP stellt Mittel zur Verfügung, um die Infrastruktur für eine schnelle, problemlose Kommunikation zu schaffen.



Simulation einer Kollision von hochenergetischen Bleikernen in ALICE. Dabei wird kurzzeitig der Zustand erzeugt, der unmittelbar nach dem Urknall im Universum herrschte.

Forschungsschwerpunkt ALICE

Deutschland ist über die Universitäten Heidelberg, Frankfurt, Münster, die Technische Universität Darmstadt, die Fachhochschulen Köln und Worms sowie die Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) in Darmstadt an ALICE beteiligt. Im Rahmen des FSP-201 werden in den nächsten Jahren 100 Wissenschaftler und Ingenieure für ALICE arbeiten, etwas über 40% davon sind Doktoranden. Weltweit werden etwa 1.000 Mitarbeiter für ALICE tätig sein, die aus über 90 Institutionen und 27 Ländern kommen. Der Bau von ALICE kostete rund 100 Mio. Euro, von denen Deutschland ein Fünftel übernommen hat; für den Betrieb in den nächsten zehn Jahren werden 4,8 Mio. Euro pro Jahr, davon ca 0,4 Mio. Euro von deutschen Gruppen, veranschlagt.

Von EUROBALL über MINIBALL zu AGATA

Verbundforschung wird zwar an Großgeräten betrieben, muss aber trotzdem nicht ortsgebunden sein. Als typische Beispiele für Experimente, die im Rahmen der Verbundforschung durch internationale Kollaborationen realisiert werden und die von vornherein für den Einsatz an mehreren Standorten vorgesehen sind, finden sich die großen Gammaskpektrometer. Für Untersuchungen zur Kernstruktur stellen sie ein unverzichtbares Instrument dar.

Hinsichtlich ihrer Eigenschaften haben sich Detektoren aus dem Element Germanium als optimal erwiesen. Da es aus technischen Gründen nicht möglich ist, beliebig große Germaniumkristalle herzustellen, werden die Kristalle gekapselt und dann zu so genannten Clustern oder anderen Einheiten mit gemeinsamer Kühlung und Auswertungs elektronik zusammengestellt. Bei den modernen Hoch-

leistungs-Gammaskpektrometern sind die Detektoreinheiten auf einer Kugeloberfläche, genauer: auf einer Polyederoberfläche ähnlich der Oberfläche eines Fußballs, angeordnet, damit sie die Ereignisse im Zentrum möglichst aus allen Raumrichtungen messen können.

So war auch das Ende der 1990er-Jahre gebaute Gerät EUROBALL konzipiert, das von 1997 bis 1998 am Nationallaboratorium (LNL) in Legnaro (Italien) und von 1999 bis 2003 am Beschleuniger des kernphysikalischen Instituts der Universität Straßburg eingesetzt wurde. Seine Besonderheit war die Bündelung von je sieben gekapselten Germaniumdetektoren zu einem Clusterdetektor. Insgesamt 15 Clusterdetektoren waren auf der Polyederoberfläche – von einem Wabengestell gehalten – untergebracht.



MINIBALL am CERN ist ein Gammaskpektrometer, das speziell für die Untersuchung exotischer Kerne eingesetzt wird. MINIBALL besteht aus 24 sechsfach segmentierten, gekapselten Germaniumdetektoren, die in Einheiten zu je drei Detektoren in einem gemeinsamen Kryostaten zusammengefasst sind. Der untersuchte Strahl stammt vom Beschleuniger REX-ISOLDE.



Das Gammaskpektrometer AGATA ermöglicht erstmals eine lückenlose Abdeckung des vollen Raumwinkels mit Detektoren. Seine Leistungsfähigkeit übertrifft die bisheriger Geräte für die Kernspektroskopie um mehrere Größenordnungen.

An der EUROBALL-Arbeitsgemeinschaft waren während des Betriebszeitraumes sechs Länder mit mehr als 25 Arbeitsgruppen beteiligt. Aus Deutschland gehörten Arbeitsgruppen aus Berlin, Bonn, Göttingen, Jülich, Köln und Rossendorf dazu. Die Gesamtkosten wurden etwa zu einem Viertel als Verbundforschungsfördermittel durch das BMBF getragen.

Nach Abschluss der EUROBALL-Experimente in Straßburg kamen die Clusterdetektoren in dem im Sommer 2003 begonnenen RISING-Projekt am Fragmentseparator (FRS) der GSI zum Einsatz, dessen wissenschaftliches Ziel die hochauflösende Gammaskpektroskopie von Fragmentationskernen weitab des Stabilitätstals ist.

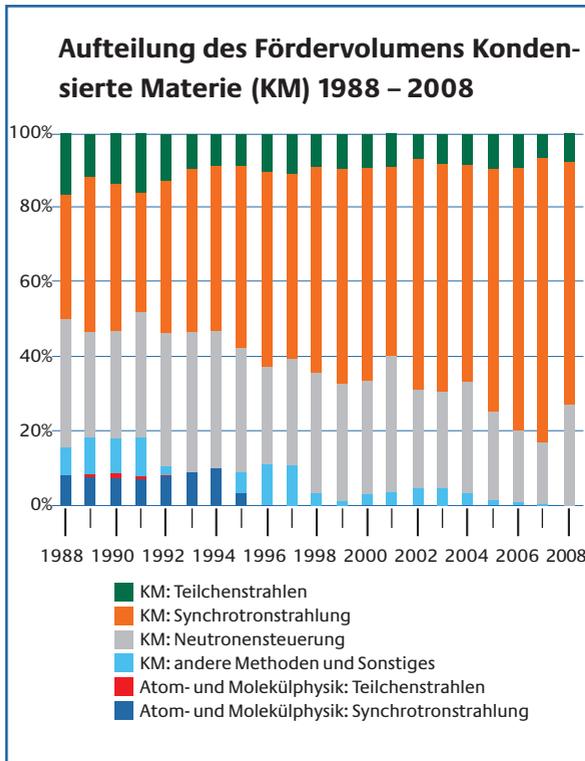
Ähnliche Ziele, nämlich das Studium so genannter exotischer Kerne, werden in den Experimenten am Beschleuniger REX-ISOLDE am CERN verfolgt. Die Intensitäten dieser radioaktiven Kerne sind um Größenordnungen geringer als die von stabilen Strahlen, sodass man ein besonders empfindliches Gammaskpektrometer benötigt, um den Zerfall der Kerne untersuchen zu können. Mit MINIBALL wurde im Rahmen einer europäischen Kollaboration unter deutscher Federführung (Köln, Heidelberg, München, Göttingen) für diese Experimente ein solches Gammaskpektrometer entwickelt, dessen Besonderheit die segmentierten Detektorkristalle sind. „Somit wird eine höhere Granularität der Zähler bei gleicher Kristallgröße erreicht“, erläutert Prof. Dr. Reiner Krücken, einer der leitenden Wissenschaftler am neuen Experiment AGATA.

In CERN-Strahlzeitpausen stand das Spektrometer für andere Experimente zur Verfügung; so wurde es beispielsweise im Frühjahr 2002 und im Winter 2003 im Kölner Tandemlabor erfolgreich eingesetzt.

Während bei EUROBALL und MINIBALL nur ein Teil der Segmente der Polyederoberfläche mit Detektoren bestückt war (aber gleichmäßig über die Oberfläche verteilt), wird mit AGATA (Advanced Gamma Tracking Array) erstmals ein Gammaskpektrometer zur Verfügung stehen, bei dem eine lückenlose Abdeckung des vollen Raumwinkels mit Detektoren erreicht wird. Seine Leistungsfähigkeit übertrifft die bisheriger Geräte um mehrere Größenordnungen – auch bedingt durch die nun 36-fache Segmentierung der Germaniumkristalle. Eine funktionstüchtige, aber noch nicht vollständig ausgebaute Version von AGATA, an der 350 Wissenschaftler aus 44 europäischen Forschungsinstitutionen mitarbeiten, soll ab 2012 für Experimente am LNL in Legnaro, bei GANIL (Grand Accélérateur National d'Ions Lourds) im französischen Caen, sowie an der GSI in Darmstadt zur Verfügung stehen. Das Array soll 2015 fertig sein und wird dann vor allem bei der Anlage SPIRAL II des GANIL sowie bei der neuen Anlage FAIR in Darmstadt zum Einsatz kommen.

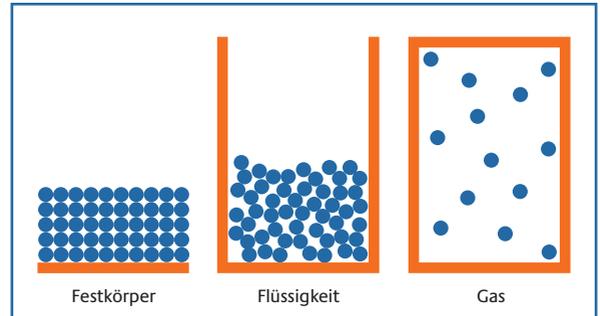
AGATA dient ebenfalls zur Untersuchung exotischer Kerne weitab des Tals der stabilen Kerne. „Insbesondere die hohen Geschwindigkeiten der Kerne bei der Emission von Gammaphotonen führen zu sehr großen Dopplereffekten. Die hohe Granularität von AGATA erlaubt es, den Eintreffort der Photonen im Detektor auf wenige Millimeter genau zu bestimmen und damit die Dopplereffekte zu korrigieren, was wiederum die notwendige hohe Energieauflösung für die Experimente bringt“, so Reiner Krücken.

Drum prüfe, was sich bindet ...



Kondensierte Materie – da denkt man an das Badezimmerfenster nach dem Duschen, die beschlagene Brille im Winter, die Flasche Bier aus dem Kühlschrank. In der Tat spielt hier Kondensation die Hauptrolle, nämlich die von gasförmigem Wasserdampf bzw. Luftfeuchtigkeit zu flüssigem Wasser. Wasser ist also kondensierte Materie, und verallgemeinert kann man sagen: Alles, was nicht gasförmig, sondern in irgendeiner Form gebunden ist, zählt zur kondensierten Materie.

Wissenschaftler, die sich mit kondensierter Materie beschäftigen, haben es also immer mit vielen miteinander wechselwirkenden Teilchen zu tun. Die Gesetzmäßigkeiten, die deren Zusammenspiel ausmachen, sind ganz andere als etwa in der Hochenergiephysik, wo versucht wird, die Materie in ihre kleinsten Bausteine zu zerlegen. So allgemein die Definition der kondensierten Materie ist, so vielfältig sind die Erscheinungsformen, die sie annehmen kann. Neben den Flüssigkeiten und den klassischen Festkörpern wie Kristallen fallen auch biologische



Stellt man sich die Atome und Moleküle, aus denen Materie aufgebaut ist, als Kügelchen vor, dann berühren sich diese Kügelchen in kondensierter Materie ständig, während sie im Gas nur gelegentlich aufeinandertreffen.

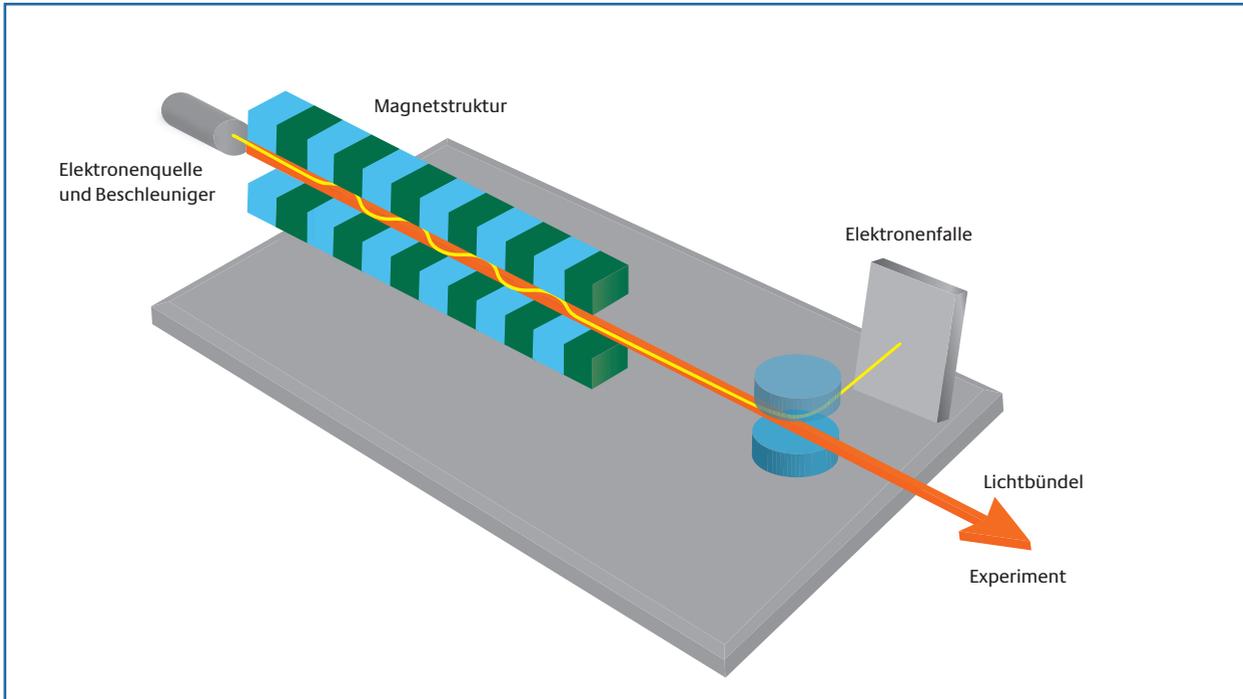
Materialien, Polymere, Kolloide und Gläser darunter. Sie weisen eine Fülle verschiedener Eigenschaften auf und entsprechend gibt es auch nicht *die* eine Untersuchungsmethode für kondensierte Materie, wie es etwa die Kollisionsexperimente in der Teilchenphysik sind.

Synchrotronstrahlung

Allen modernen Experimentiermethoden für kondensierte Materie ist jedoch gemein, dass man den Untersuchungsgegenstand nicht auseinandernehmen oder zerstören muss. Konrad Röntgen hat die Wissenschaft von diesem Übel befreit und gezeigt, dass man sogar lebende Organismen durchleuchten kann – seit Jahrzehnten werden Röntgenstrahlen in der medizinischen Diagnostik benutzt.



Physik meets Kunst: Mit der Röntgenstrahlung aus der Synchrotronstrahlungsquelle DORIS III am DESY wurde das Bild „Grasgrund“ von Vincent van Gogh, das später übermalt wurde, untersucht. Indem die Fluoreszenz der einzelnen Farbschichten gemessen wurde, konnte das ursprüngliche Bild rekonstruiert werden: ein Frauenkopf.



Werden Teilchen in einem Speicherring beschleunigt, tritt Synchrotronstrahlung auf. Um die Eigenschaften dieser Strahlung zu verbessern, baut man so genannte Wiggler und Undulatoren – lineare Magnetanordnungen, welche die Teilchen auf einen Schlingerkurs zwingen, sodass sich die abgestrahlten Lichtwellen überlagern. Wiggler und Undulatoren sind die Nachfolger der Ablenkmagnete in einem Speicherring. Sie werden heutzutage weltweit in Laboratorien zur Erzeugung von Synchrotronstrahlung eingesetzt. Solche Freie-Elektronen-Laser erzeugen extrem intensives Röntgenlicht mit Lasereigenschaften, bei anderer Elektronenenergie aber auch Laserlicht z. B. im Infrarotbereich.

Seit den 1970er-Jahren ist die Nutzung der Synchrotronstrahlung zu einer der wichtigsten Methoden für das Studium der kondensierten Materie geworden. Ursprünglich war sie ein zunächst unerwünschtes Beiprodukt der Elektronenbeschleuniger der Hochenergiephysik, das immer dann anfällt, wenn man sehr schnelle Elektronen auf eine Kreisbahn zwingt. Für die Untersuchung schneller Elektronen ist das ärgerlich, weil man den Energieverlust immer wieder kompensieren muss. Die Nutzer der Synchrotronstrahlung freuen sich hingegen über eine äußerst brillante und intensive Lichtquelle, mit der man selbst in kleinste Proben hineinschauen und Strukturänderungen in sehr kurzen Zeiträumen verfolgen kann. Kein Wunder also, dass sich rund um die großen Ringbeschleuniger, die Synchrotronstrahlung produzieren, zahlreiche Messplätze und Experimente angesiedelt haben – die Palette der Materialien, mikroskopischen Systeme, Phänomene und Prozesse in kondensierter Materie, die mittels Synchrotronstrahlung erforscht werden können, ist nahezu unbegrenzt.

Einen großen Verdienst an der Nutzbarmachung der Synchrotronstrahlung hat zweifellos die Verbundforschung. Der Speicherring BESSY in Berlin etwa wurde beim Bau nur mit einigen wenigen Experimentierstationen ausgestattet, heute sind es über 30 – viele davon konzipiert, errichtet und erfolgreich in Betrieb genommen durch die Verbundforschung. „Die Synchrotronlandschaft wäre in Deutschland ohne die Verbundforschung nur die Hälfte wert“, resümiert Prof. Dr. Ullrich Pietsch, der Vorsitzende des Komitees Forschung mit Synchrotronstrahlung (KFS), und ergänzt: „Erst sie schuf die Experimente, die auch für ein internationales Publikum attraktiv sind. Umgekehrt wirkt die Verbundforschung für viele deutsche Universitätsgruppen wie ein internes Trainingsprogramm, um auch an den großen internationalen Anlagen wie der ESRF erfolgreich sein zu können.“

Neutronen

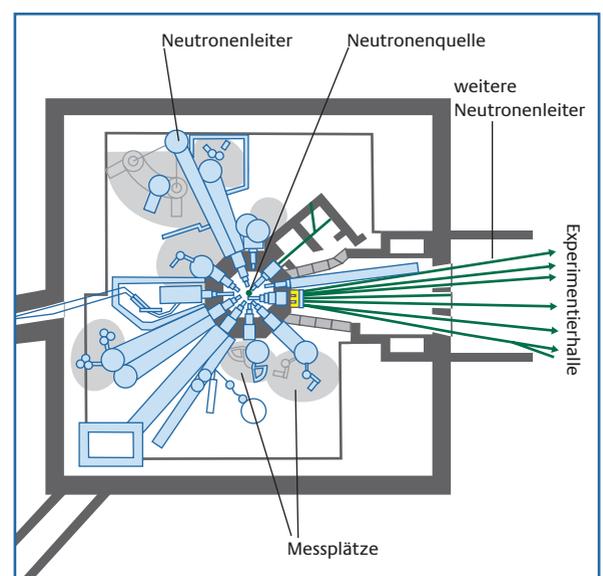
Nun ist auch die Synchrotronstrahlung keine eierlegende Wollmilchsau, sprich: Sie hat ihre Grenzen. So scheitert sie an der Strukturaufklärung von leichten Elementen in der Nachbarschaft von sehr schweren, weil die Strahlung mit der Elektronenhülle in Wechselwirkung tritt, und diese ist bei schweren Elementen deutlich größer als bei leichten. Ein Wasserstoffelektron wird beispielsweise neben 208 Bleielektronen einfach übersehen. Neutronen hingegen treten mit dem Atomkern in Wechselwirkung, wobei die Stärke dieser Wechselwirkung recht stark und scheinbar unsystematisch innerhalb des Periodensystems variiert. Mit Neutronen können daher auch im Periodensystem benachbarte Atome klar unterschieden werden und leichte Atome bleiben sichtbar neben den schweren.

Verschiedene Isotope ein und desselben Elements können gänzlich verschiedene Streuquerschnitte aufweisen – für Röntgen- oder Synchrotronstrahlung sehen hingegen alle Isotope gleich aus. Wenn man nun beispielsweise in einer biologischen Probe in einzelnen funktionellen Gruppen den normalen Wasserstoff durch das Isotop Deuterium ersetzt, kann man diese damit markieren, also für Neutronenexperimente „einfärben“. Diese Kontrastvariation erlaubt die Bestimmung von Position und Bewegung einzelner Moleküle oder Gruppen in einem komplexen System.

Neutronen haben darüber hinaus noch weitere einzigartige Eigenschaften, die sie für die Analyse besonders wertvoll machen. Da sie elektrisch neutral sind, dringen sie tief in Materie ein, in typischen technischen Werkstoffen viele Zentimeter. Weil wegen der elektrischen Neutralität die besonders starke elektromagnetische Wechselwirkung entfällt, gehen sie dabei sehr vorsichtig zu Werke: Mit Neutronen können auch empfindliche biologische Proben zerstörungsfrei untersucht werden. Schließlich verhalten sich Neutronen in gewisser Weise wie winzige Magnete – Physiker sprechen vom magnetischen Moment des Neutrons – und sind daher ideale Sonden für die Aufklärung magnetischer Strukturen. Unter allen Methoden besitzen Neutronen hier ein echtes Alleinstellungsmerkmal.

Die Forschung mit Neutronen findet an speziellen Kernreaktoren statt, den „Neutronenquellen“. In ihnen wird – anders als bei ihren Verwandten aus der Stromerzeugung – kaum Energie erzeugt, dafür jedoch eine große Menge von Neutronen. Neben der Kernspaltung können Neutronen auch durch den Beschuss eines Schwermetallkörpers mit hochenergetischen Protonen im Prozess der so genannten Spallation erzeugt werden, wobei die Quellstärke dabei deutlich über der von Reaktoren liegt. Der Aufbau einer europäischen Spallationsquelle wird deshalb geplant.

Auch die Verbundforschung mit Neutronen ist eine „Erfolgsgeschichte“, betont Prof. Dr. Götz Eckold, Vorsitzender des Komitees Forschung mit Neutronen (KFN). „Die Neutronen-Nutzergemeinde in Deutschland ist eine der größten der Welt, die Neutronenstreuung hierzulande quasi beheimatet – dank der Verbundforschung.“ Eine Fülle an Instrumenten und viele technische Neuentwicklungen habe die Förderung auf den Weg gebracht und dabei nicht nur das Geld beigesteuert. „Vor allem nutzt die Verbundforschung die Leistungsfähigkeit der Universitäten und bringt viele extrem engagierte Gruppen an die Großgeräte, die sich auch um die Nutzer und deren Bedürfnisse kümmern.“



Übersicht über das Reaktorgebäude des FRM II: Die Experimentierhalle ist im Gebäude selbst integriert. Östlich (links) findet sie ihre Fortsetzung in einer kleineren Experimentierhalle. Der Experimentierhalle im Reaktorgebäude ist westlich (rechts) die Neutronenleiterhalle angeschlossen.

Der dritte Weg

Klein, aber fein – das könnte man dem dritten Weg, kondensierte Materie zu untersuchen, als Überschrift mitgeben: die Forschung mit nuklearen Sonden und Ionenstrahlen. Das Fördervolumen ist das kleinste innerhalb des BMBF-Förderbereichs „Erforschung kondensierter Materie an Großgeräten“, das wissenschaftliche Potenzial ist dennoch enorm und weit gespannt: Es reicht von den Schwerpunkten Festkörperphysik und Materialforschung über die Bio- und Geowissenschaften bis hin zur Medizin und der Kunstwissenschaft.

Unter nuklearen Sonden versteht man sowohl die instabilen Kerne radioaktiver Atome – die so genannten Radionuklide – als auch instabile Teilchen wie Myonen. Die Mikroskopie mit Positronen – den positiv geladenen Zwillingen der Elektronen – wird ebenfalls dazu gerechnet. Die Sonden werden in das Material, das untersucht werden soll, eingebracht und reagieren dort mit den vorhandenen elektromagnetischen Feldern oder erzeugen Sekundärteilchen, die man dann anschließend auswerten kann. Auch Ionenstrahlen treten mit den Atomkernen oder Elektronen der Materie, in die sie eindringen, in Wechselwirkung. Je nachdem, auf welche

Elemente sie dort treffen, werden sie auf charakteristische Weise abgebremst oder gestreut und verursachen Kernanregungen und -umwandlungen. Auf diese Weise ist es möglich, fast alle Elemente in beliebigen Materialien mit hoher Empfindlichkeit nachzuweisen. Mit Ionenstrahlen lassen sich zudem Materialien bearbeiten, modifizieren und strukturieren. Außerdem kann man das Verhalten von Werkstoffen unter extremen Bedingungen simulieren. Das ist beispielsweise wichtig für die Forscher am LHC, die Teile ihrer Anlage einer massiven Strahlenbelastung aussetzen. Mithilfe von Ionenstrahlen können sie vorher schon testen, was sie erwartet. Die Bedeutung der Forschung mit nuklearen Sonden und Ionenstrahlen hat in den letzten 15 bis 20 Jahren international stark zugenommen. Daran hat auch die Verbundforschung ihren Anteil. Ein Paradebeispiel dafür ist die Instrumentierung am Isotopenseparator ISOLDE am CERN, die „weltweit vielseitigste Quelle für Radionuklide“, wie der Vorsitzende des Komitees für Forschung mit nuklearen Sonden und Ionenstrahlen, Prof. Dr. Hans Hofsäss, hervorhebt. „Dort wurde rund um das Großgerät eine komplette Infrastruktur mit Apparaturen auch für die Probenpräparation und -analyse aufgebaut, die viele europäische Gruppen anzieht. Ohne die Verbundforschung wäre das nicht gegangen.“

FLASH – Besser als jeder Laser

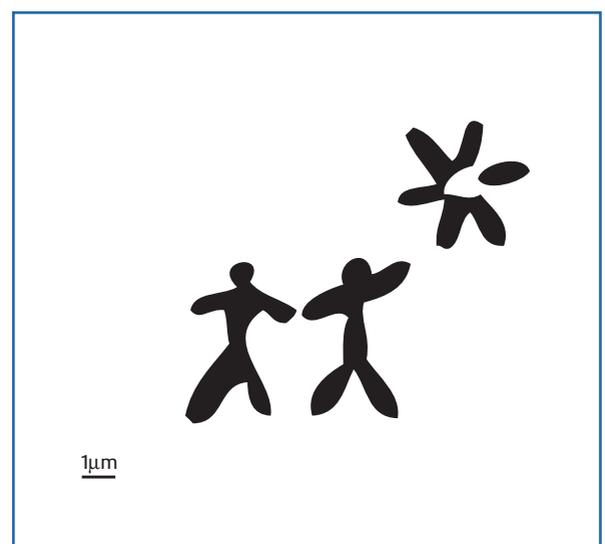
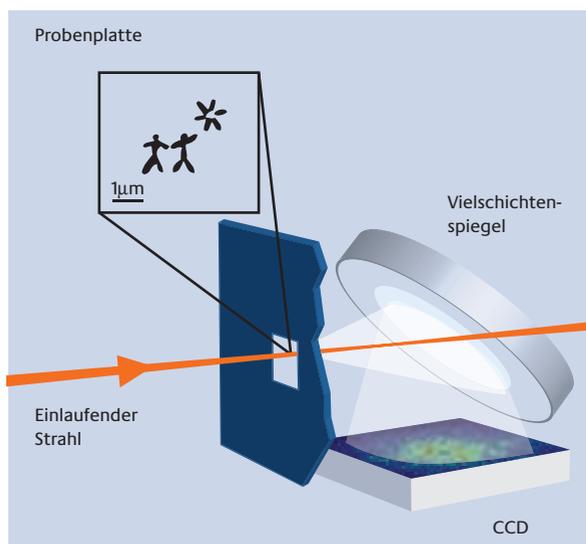
Am DESY stehen den Forschern einige exzellente Lichtquellen zur Verfügung. Eine ganz besondere Stellung nimmt jedoch FLASH ein, eine „neuartige Quelle für Synchrotronstrahlung mit bis dahin unerreichten Eigenschaften“, wie es Prof. Dr. Wilfried Wurth, Koordinator des Forschungsschwerpunkts FLASH, kurz und knapp auf einen Nenner bringt. Unter den modernen Lichtquellen spielt FLASH eine absolute Vorreiterrolle und liefert eine Röntgenstrahlung, die sowohl die besten Synchrotronstrahlungsquellen als auch die modernsten Lasersysteme nicht zur Verfügung stellen können.

FLASH ist ein so genannter Freie-Elektronen-Laser (FEL). Das Licht wird – ähnlich wie bei der Synchrotronstrahlung – durch beschleunigte Elektronen erzeugt. Allerdings werden die Elektronen hier nicht in einem Ring beschleunigt, sondern stammen aus einem supraleitenden Linearbeschleuniger. Zur Lichtquelle werden sie erst im Undulator, einer speziellen Magnetanordnung, in der die Elektronen zu einem Slalomkurs und damit zur Aussendung von Lichtblitzen gezwungen werden. Diese verstärken sich durch Überlagerungen auf dem Weg durch den Undulator zu kurzwelligen, intensiven Laserlichtblitzen mit den für FLASH einzigartigen Merkmalen. Die Lichtimpulse dauern nicht länger als einige Femtosekunden – das ist unvorstellbar

kurz: Eine Femtosekunde verhält sich zu einer Sekunde wie siebeneinhalb Minuten zum Alter des Universums! Der Femtosekundenbereich ist eine äußerst interessante Zeitskala, auf der sich etwa die Bildung von Molekülen oder der Elektronentransport in Leitern abspielt. „Mithilfe von FLASH kann man solchen Vorgängen wie mit einem Stroboskop zuschauen“, erläutert Wilfried Wurth den Nutzen. „Die zeitaufgelöste Verfolgung derartiger Prozesse gehört zu den zentralen Aufgaben, die man mit Röntgenlasern wie FLASH zukünftig angehen möchte.“

Die Lichtblitze von FLASH sind außerdem extrem intensiv: In einem einzigen Impuls stecken 10^{13} Photonen – bei einem herkömmlichen Synchrotron verteilt sich diese Anzahl auf eine ganze Sekunde. In dem Spektralbereich, in dem FLASH operiert – vom extremen Ultraviolett bis zur weichen Röntgenstrahlung – ist der Freie-Elektronen-Laser „anderen Quellen um sechs bis acht Größenordnungen überlegen“, so Wurth.

Schließlich stieß auch die räumliche Auflösung von FLASH von Beginn an in den wissenschaftlich so wichtigen Nanometerbereich vor. Bereits in der ersten Messperiode 2005/06 hielt FLASH mit 32 Nanometern den Weltrekord der kürzesten, je mit einem



Auf dem Weg zur Strukturanalyse am Einzelmolekül sind an FLASH zahlreiche Pionierexperimente und viele Highlights gelungen. 2006 konnte erstmals gezeigt werden, dass ein Impuls ausreicht, um ein Beugungsbild rekonstruieren zu können. Die FEL-Pulse trafen auf die Probe und verließen dann die Kamera durch ein Loch im Vielschichtenspiegel. Dieser reflektierte nur das von der Probe auf den CCD-Detektor gebeugte Licht, der ein zusammenhängendes Beugungsbild aufzeichnet. Ein Computerprogramm wandelte diese Struktur in ein Bild der Probe um: zwei kleine Cowboys in der Sonne.

Freie-Elektronen-Laser erzeugten Wellenlänge. Nach dem weiteren Ausbau von FLASH konnte die Wellenlänge inzwischen bis auf sechs Nanometer reduziert werden. „Das ist zwar noch nicht die Längenskala von Molekülen“, so Wilfried Wurth, „doch viele Nanostrukturen lassen sich damit untersuchen, beispielsweise Zellen oder Kolloidpartikel. FLASH erweist sich also als extrem gutes Mikroskop für den Nanobereich. Mit dem europäischen Röntgenlaser „European XFEL“ wird man in Zukunft Wellenlängen von einem Angström erreichen, was atomaren Abständen entspricht.“

Doch wird nicht eine Probe, beispielsweise ein Molekülkomplex, durch den intensiven Laserpuls zerstört? Die schlechte Nachricht: Ja. Die gute Nachricht: Das macht nichts, weil erstens das

Beugungsbild schneller aufgenommen wird, als das Objekt kaputt geht, und zweitens ein einzelnes Bild tatsächlich genügend Informationen enthält. Ein Schuss, ein Treffer: Im Single-Shot-Verfahren wird tatsächlich nur ein Molekülkomplex benötigt, um ein aussagekräftiges Beugungsbild zu erzeugen. Daraus erwächst ein großer Vorteil: „Normalerweise muss man in der Röntgenstrukturanalyse Proteinkristalle heranzüchten, um genügend Volumen für Streuexperimente zu haben. Allerdings ist das Kristallzüchten eine große Kunst, die nicht ohne Weiteres gelingt.“ Freie-Elektronen-Laser wie der europäische XFEL hingegen, so Wilfried Wurth, „ermöglichen die Strukturanalyse an einem einzelnen Molekül.“

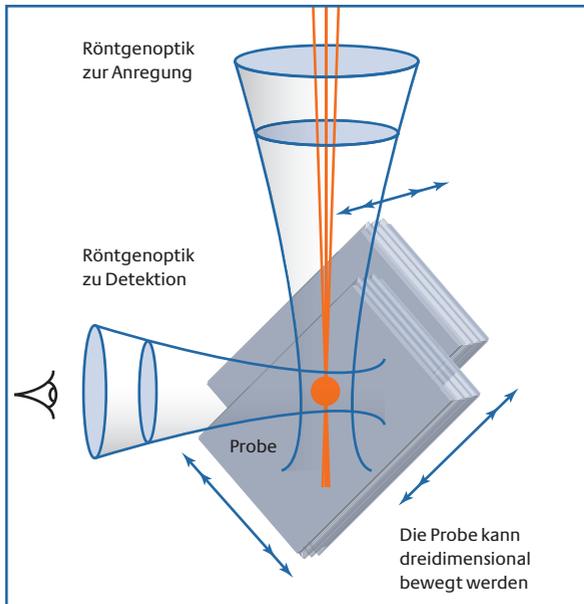
Ergebnisse mit nur einem „Schuss“

Die bisherigen Experimente an FLASH zeigen, dass es schon in naher Zukunft mithilfe eines einzigen ultrakurzen, extrem intensiven Laserpulses möglich sein sollte, Bilder von Nanoteilchen oder sogar von einzelnen großen Makromolekülen – Viren oder Zellen – aufnehmen zu können. Dies verspricht einzigartige Möglichkeiten, die Dynamik von Nanoteilchen und die Struktur großer Biomoleküle zu untersuchen, ohne die Proben vorher aufwendig kristallisieren zu müssen, wie es bei der herkömmlichen Röntgenstrukturanalyse erforderlich ist.

Forschungsschwerpunkt FLASH

Im Juli 2007 wurde mit dem FSP-301 „FLASH“ der vierte BMBF-Forschungsschwerpunkt eingerichtet. Er unterstreicht die „Leuchtturm“-Funktion dieser einmaligen Photonenquelle für die Erforschung der Kondensierten Materie auf der Nanoskala. Mit dem FSP-301 werden Pionierexperimente unterstützt, die nicht nur statische Informationen über die Eigenschaften von Atomen, Molekülen, Clustern und Festkörpern gewinnen, sondern aufgrund der brillanten Eigenschaften der Strahlung von FLASH auch deren Evolution auf atomaren Zeitskalen verfolgen. Als Exzellenznetzwerk führt der Forschungsschwerpunkt internationale Spitzenforschung mit Freie-Elektronen-Lasern zusammen, die das langfristige Ziel des Röntgenlasers European XFEL optimal vorbereiten.

Physik im Dienst von Kunst und Kultur



Die 3D-Mikro-Röntgenfluoreszenzanalyse benutzt zwei Röntgenoptiken: Die erste bündelt die Synchrotronstrahlung auf die Probe, die zweite fokussiert den „Blick“ des Detektors. Mit diesem Prinzip kann man den Untersuchungsgegenstand nach und nach auch in die Tiefe abtasten.

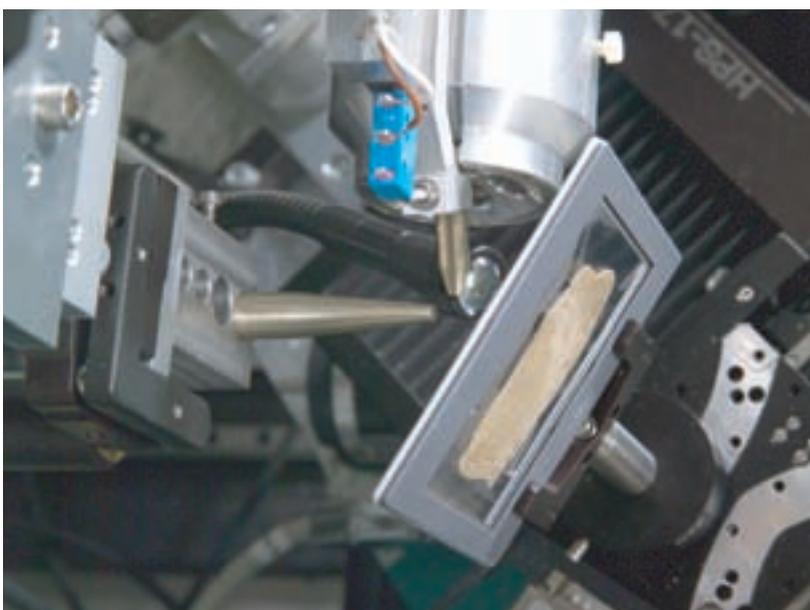
Die Röntgenfluoreszenzanalyse ist ein etabliertes Verfahren der zerstörungsfreien Materialprüfung, mit dem die elementare Zusammensetzung einer Probe bestimmt werden kann. Dabei wird die Probe mit Röntgenstrahlung zunächst angeregt, anschließend gibt sie die Energie in Form eines Fluoreszenz-

signals wieder ab. Die Energie dieser sekundären Röntgenstrahlung ist dabei charakteristisch für das Element, auf das die primäre Strahlung getroffen ist, und ihre Intensität ein Maß für die Konzentration des Elements – insgesamt erhält man also einen eindeutigen „Fingerabdruck“.

Das Besondere an der 2008 mit dem Röntgenpreis der Universität Gießen ausgezeichneten 3D-Mikro-Röntgenfluoreszenzanalyse, die Prof. Dr. Birgit Kanngießer und ihr Team von der TU Berlin am Berliner Ringbeschleuniger der BESSY entwickelten, ist die Verwendung von zwei Röntgenoptiken. Die erste Linse fokussiert die vom Speicherring gelieferte Synchrotronstrahlung auf die Probe, die zweite Linse fokussiert den Blick des Detektors. Im Kreuzungspunkt der beiden Brennpunkte befindet sich das zu untersuchende Volumen. Mit dieser Methode kann man sich nun Mikrometer für Mikrometer durch die Probe tasten, und zwar „auch in die Tiefe, indem man die Probe verschiebt“, sagt Birgit Kanngießer. „Das ist das Neue an unserem Verfahren.“ Durch die Fokussierung des Detektors auf die Probe wird zudem das Verhältnis vom Signal zum unerwünschten Untergrund verbessert.

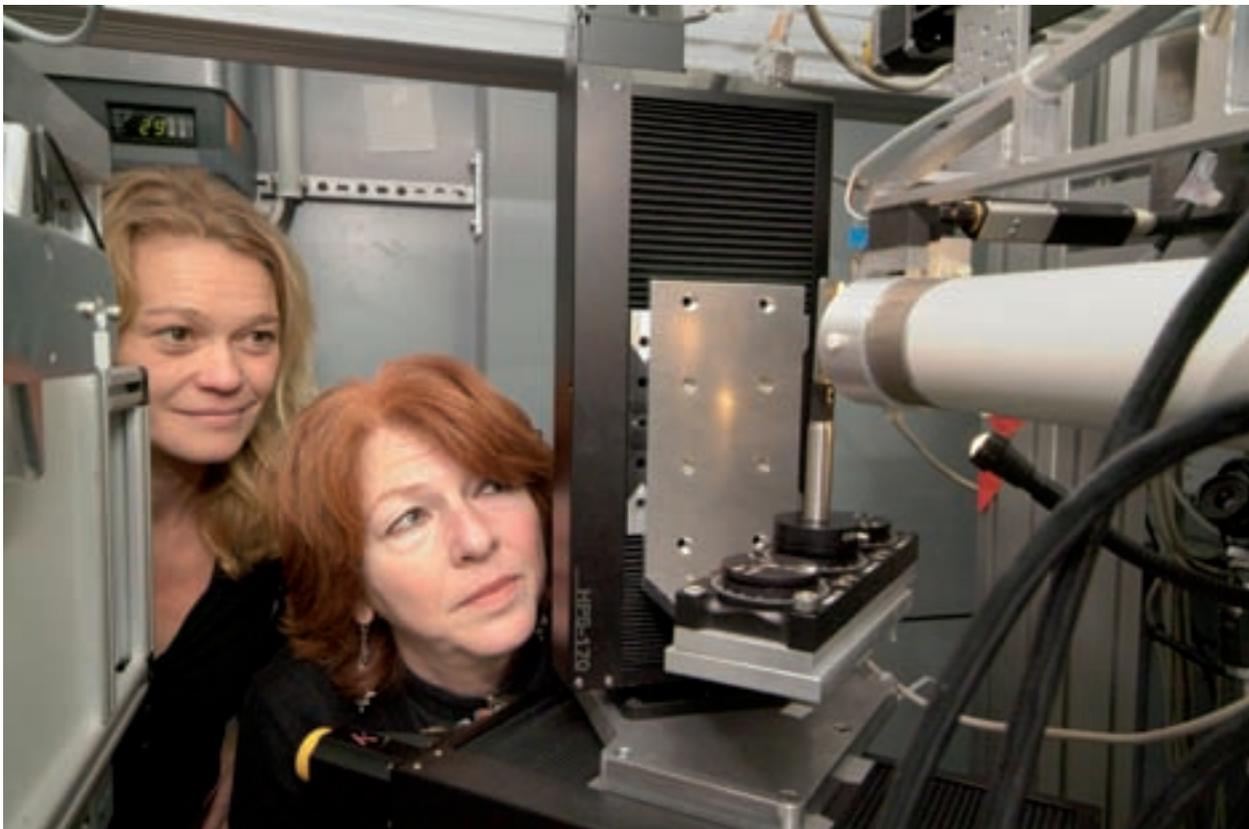
2006 wurde der Messplatz μ Spot endgültig eingerichtet und steht nun den Nutzern zur Verfügung. Die Röntgenstrahlung einer Synchrotronquelle wie BESSY eignet sich besonders für die Untersuchung von Kunst- und Kulturgegenständen. Man kann mit ihr selbst kleinste Spuren chemischer Elemente, die etwa in Tinte oder Farbe stecken, nachweisen, ohne das Untersuchungsobjekt zu beschädigen. Wenn der Röntgenstrahl nach und nach die ganze Probe abtastet, erstellt er eine „chemische Landkarte“, die Kunsthistorikern und Archäologen Auskunft über Herstellungstechniken und Herkunft der Gegenstände liefert.

Damit die Museen und Bibliotheken ihre empfindlichen Schätze auch zur Untersuchung ins Labor bringen, spendierte BESSY dem Messplatz noch eine Klimaanlage, mit der Temperatur und Feuchtigkeit konstant gehalten werden können. So wird gewährleistet, dass die Antiquitäten und „alten Schinken“ nicht nur das Röntgen, sondern auch den Wechsel der Umgebung gut überstehen.



Das Fragment einer Qumran-Rolle vor der Analyse im μ Spot-Messplatz.

Schon kurz nach der Fertigstellung hatte der neue Messplatz ein prominentes Objekt im Fokus: Pergamentfragmente der Schriftrollen von Qumran, jenem sensationellen Fund am Toten Meer im Jahr 1947, den wohl viele Altertumswissenschaftler gerne vor der Lupe hätten. Die Berliner Forscher wollen u. a. zur Lösung der Frage beitragen, ob die Schriftrollen tatsächlich vom Toten Meer stammen. Eine Überraschung gab es bei der Untersuchung indischer Moghulminiaturen. „Wir konnten nachweisen, dass die Figuren ohne Grundierung direkt auf den Karton gemalt wurden“, fasst Birgit Kanngießer das Ergebnis zusammen. Die Methode eignet sich aber auch für die Untersuchung biologischer Proben, wie die Berliner Gruppe bei der Analyse einer kompletten Pflanzenwurzel zeigen konnte.



Dr. Ira Rabin (rechts) von der Jüdischen National- und Universitätsbibliothek in Jerusalem brachte Fragmente der Qumran-Rollen nach Berlin, die von Prof. Dr. Birgit Kanngießer an ihrem Versuchsstand zur dreidimensionalen Röntgenfluoreszenzanalyse bei BESSY untersucht wurden.

PUMA – Erfolgreiche Großforschungskatze

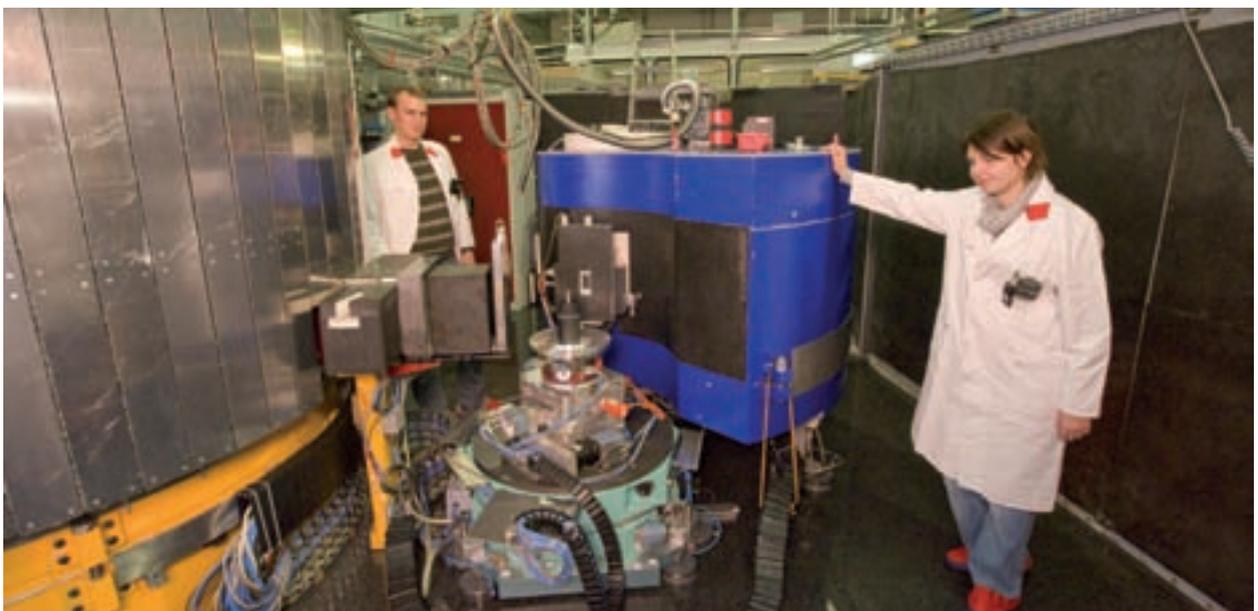
Wenn man wissen möchte, ob ein Instrument bei den Nutzern ankommt, macht man am besten eine Umfrage. Bei PUMA ist die Resonanz eindeutig: Dem Anspruch, eines der leistungsfähigsten Geräte seiner Art zu sein, konnte es bereits in den ersten Betriebsjahren gerecht werden. „Das macht uns ein bisschen stolz“, gibt Prof. Dr. Götz Eckold, dessen Göttinger Institut PUMA gebaut hat, zu, „und ist natürlich auch eine schöne Bestätigung der BMBF-Förderung.“ Das Dreiachsenspektrometer PUMA gehört zu den Instrumenten der ersten Generation am Münchner Forschungsreaktor FRM II, seit 2005 die stärkste deutsche Neutronenquelle. Der Bau von PUMA begann schon 1998, erste Tests erfolgten 2004.

Mit dem Beginn des Routinebetriebs am FRM II klopfen bereits die ersten externen Nutzer bei PUMA an. „Das Instrument war also direkt ein Arbeitspferd für die Neutronenstreuung“, sagt Götz Eckold. Die Dreiachsenspektroskopie ist eine der leistungsfähigsten der modernen Festkörperforschung und wurde bereits in den 1950er-Jahren entwickelt. Vereinfacht gesagt filtert PUMA aus den Neutronen des Reaktors mithilfe eines Monochromators die Teilchen mit einer bestimmten Energie heraus, schickt sie auf eine Probe, an der die Neutronen gestreut werden, und weist sie schließlich abhängig vom Streuwinkel im Detektor nach.

Das Besondere an der Dreiachsenspektroskopie ist, dass alle Komponenten – Monochromator, Probe, Analysator – auf Drehachsen angebracht sind, die sich unabhängig voneinander bewegen lassen. Durch Drehung des gesamten Spektrometers um die drei Achsen gelingt es, nacheinander die Streuintensitäten für verschiedene Energie- und Impulsänderungen zu ermitteln. Zusätzlich kann auch noch die Probe gedreht werden – die Dreiachsenspektroskopie ist ein sehr flexibles Verfahren.

Das Besondere an PUMA wiederum ist, dass alle Drehbewegungen extrem präzise auf wenige hundertstel Grad eingestellt werden können, obwohl das gesamte Instrument 60 Tonnen wiegt. Zudem ist der Probenort so dimensioniert, dass ganz verschiedene äußere Bedingungen – hohe oder tiefe Temperaturen, elektrische und magnetische Felder, hohe Drücke – realisiert werden können.

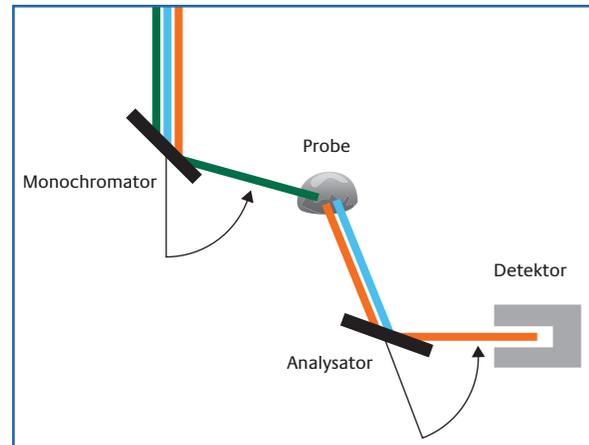
„Viele innovative Neuerungen stecken in PUMA“, sagt Eckold, „vom Neutronenstrahlrohr, das wir mitkonzipiert haben, bis zum doppelt gekrümmten Monochromator.“ In den ersten Betriebsjahren konnte gezeigt werden, dass sich mit PUMA vielseitig experimentieren lässt, in der zweiten Ausbaustufe wird nun das „MA“ im Namen des Instruments eingelöst: Multi-Analysator.



Ein Praktikum an PUMA – bereits während des Studiums haben Münchner Studenten die Möglichkeit, Erfahrungen an vorderster Forschungsfront zu sammeln. „Diese Ausbildung halten wir für sehr wichtig“, sagt Götz Eckold, dessen Göttinger Institut PUMA gebaut hat, „man kann gar nicht früh genug anfangen, die jungen Leute an die Großforschung heranzuführen.“

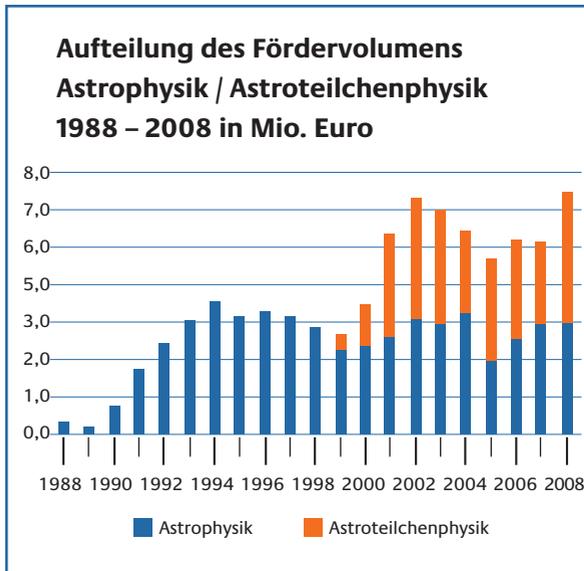
Dabei werden eine ganze Reihe von Analysatoren gleichzeitig eingesetzt – in dieser Form eine Weltpremiere. „Viele Gruppen hatten schon über so etwas nachgedacht, hielten es aber für zu aufwendig.“ Mit mehreren Analysatoren ist es möglich, ein ganzes Spektrum zu messen, ohne das Spektrometer verstellen zu müssen. „Man gewinnt viele Informationen gleichzeitig“, so der Göttinger Professor, „und kann viel leichter und schneller Übersichtsmessungen machen.“

Ein weiterer Schwerpunkt der zweiten PUMA-Phase lag auf Echtzeitstudien mit einer speziellen stroboskopischen Technik. „Die zeitaufgelöste Neutronenspektroskopie wird auch international immer wichtiger.“ Mit PUMA gelang es erstmals, die atomaren Wechselwirkungen bei Festkörperreaktionen auf einer Zeitskala von Millisekunden zu untersuchen, etwa bei so genannten Entmischungsreaktionen, die beim schnellen Abkühlen von Mischkristallen auftreten können. Bislang ging man davon aus, dass die dabei auftretenden Veränderungen der atomaren Bindungsverhältnisse nur langsam ablaufen. „Wir konnten hingegen zeigen, dass sich die Entmischung innerhalb weniger Sekunden abspielt“, sagt Götz Eckold. Das ist ein Erfolg der Grundlagenforschung, als Fernziel könnte man das dabei gewonnene Wissen über die mikroskopischen Mechanismen solcher Prozesse aber auch dazu nutzen, Festkörper gezielt zu beeinflussen.



Die drei Achsen des Spektrometers: Der Monochromator filtert Neutronen mit einer bestimmten Energie aus dem Strahl, die anschließend an der Probe gestreut und über den Analysator zum Detektor gelenkt werden.

Astro- und Astroteilchenphysik



Die Astronomie ist die älteste Wissenschaft – und das zweitälteste Gewerbe, wie manche schmunzelnd anfügen. Schon vor Tausenden von Jahren interessierten sich unsere Vorfahren für die Vorgänge am Himmel. Aber erst mit der Erfindung des Fernrohrs begann die moderne Astronomie. Seit Galileo Galilei vor 400 Jahren die vier großen Jupitermonde entdeckte, schob sich der Blick des Menschen ständig weiter ins Universum hinaus. Immer mächtigere Teleskope mit immer größeren Spiegeln wurden im Laufe der Zeit gebaut – die größten „Riesenaugen“ haben heute Spiegeldurchmesser von über zehn Metern. Sie werden mit raffinierten Techniken hergestellt, und spezielle Verfahren, wie die adaptive und aktive Optik, ermöglichen es den Astronomen, immer weiter ins All hinaus zu blicken. Jedes neue Teleskop erweitert buchstäblich unseren Horizont.

Doch auch der größte Spiegel würde wenig nutzen, wenn dahinter nicht ein hochwertiges Instrument sitzen würde. Empfindliche Detektoren, vielseitige Spektrometer, schnelle Elektronik – erst sie machen das Teleskop komplett. Deutsche Forschungsgruppen konnten in der Vergangenheit für mehrere Großteleskope solche innovativen Instrumente bauen und spannende Astronomie betreiben – „dank der Verbundforschung“, wie Prof. Dr. Dieter Reimers, Vorsitzender des Rats Deutscher Sternwarten, betont. „Ohne diese Projektförderung könnten sich deutsche Universitäten nicht an den Großteleskopen beteiligen.“ Schlimmer noch: „Die Astronomie in Deutschland wäre von dieser Entwicklung völlig abgehängt.“ Die Verbundforschung ist auch deswegen absolut notwendig, weil sich die großen Summen, die Deutschland in die verschiedenen Großteleskope investiert hat, sonst nicht wissenschaftlich amortisieren würden.

Die neuen Teleskope und Instrumente der letzten Jahrzehnte haben der Astrophysik einen enormen Erkenntnissschub beschert und sie zu einem der aufregendsten Forschungsgebiete werden lassen. Viele sprechen deshalb von einem goldenen Zeitalter der Astronomie. An mehreren Forschungsfronten gab es in den letzten Jahren entscheidende Durchbrüche und Paradigmenwechsel. So stellte sich heraus, dass die Materie im Kosmos von einer bisher unbekanntem Teilchenform, der so genannten Dunklen Materie, dominiert wird.



Die 13 Millionen Lichtjahre von uns entfernte Riesengalaxie Centaurus A ist eine elliptische Galaxie, die gerade mit einer spiralförmigen Begleitgalaxie verschmilzt. Dadurch werden neue Sterne in extrem hoher Rate erzeugt – Centaurus A stellt eines der spektakulärsten Objekte am Himmel dar. Im Zentralbereich von Centaurus A befindet sich eine sehr aktive und leuchtkräftige Region, wobei die Aktivität von einem massereichen Schwarzen Loch im Zentrum der Galaxie hervorgerufen wird. Centaurus A ist eine Quelle von starker Radio- und Röntgenstrahlung, die Aufnahme gelang mit dem APEX-Teleskop in Chile und verbindet Daten dreier verschiedener Instrumente.

Die Beobachtung, dass sich die Expansion des Universums immer noch beschleunigt, lässt zudem auf die Existenz einer Dunklen Energie schließen, deren Ursprung ebenfalls unverstanden ist. Ein Paradigmenwechsel hat auch bei den Schwarzen Löchern stattgefunden: Früher hielt man sie für exotische Objekte, heute ist man sich ziemlich sicher, dass massereiche Schwarze Löcher im Zentrum fast aller großen Galaxien existieren. Und die Beobachtung extrasolarer Planeten „war vor 15 Jahren nicht vorstellbar“, sagt Reimers, „viele Astronomen hielten Planeten für etwas ziemlich Ödes.“ Heute kennt man über 300 Exoplaneten, und dank verbesserter Teleskope besteht die Chance, in Zukunft vermehrt erdähnliche Planeten um andere Sterne zu finden – eventuell sogar mit Anzeichen von Leben.

Die Liste aktueller Fragestellungen ist aber wesentlich länger: Wie bildeten und entwickelten sich die Galaxien im frühen Universum? Existieren Gravitationswellen? Wie entwickeln sich massereiche Sterne? Was steckt hinter den rätselhaften Gammastrahlungsausbrüchen? Das sind nur einige der Themen, mit denen sich die Forscher in den nächsten Jahren beschäftigen werden. Dabei ist die Astronomie mehr als nur Selbstzweck. Das Universum stellt nämlich ein physikalisches Labor dar, das zuweilen Bedingungen hervorbringt, die auf der Erde auch mit größtem technischen Aufwand nicht herstellbar sind. So sehen die stärksten irdischen Magnete gegen die gigantischen Magnetfelder, die es um einige kosmische Objekte gibt, aus wie kleine Kühlschrankmagnete. Auch Dichte und Temperatur in einigen Himmelsobjekten sind geradezu „astronomisch“. Deswegen erlaubt die Astrophysik fundamentale Untersuchungen, die auf der Erde gar nicht möglich wären.

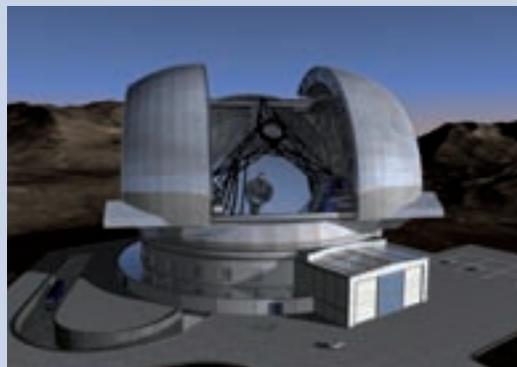
Faszinierenderweise ergeben sich dabei vielfältige Beziehungen zwischen der Kosmologie im Großen und der Physik der allerkleinsten Strukturen, zwischen der Astronomie und der Elementarteilchenphysik. Daraus ist inzwischen ein selbstständiges Forschungsgebiet geworden: die Astroteilchenphysik. Im Rahmen der Verbundforschung bildet sie einen eigenen Förderbereich mit einer stürmischen Entwicklung (siehe Grafik der Fördermittel), die Deutschland in eine führende Rolle in der Astroteilchenphysik gehoben hat. Die Astroteilchenphysiker der Universität Erlangen-Nürnberg beispielsweise

haben 2002 den ersten Antrag beim BMBF eingereicht, heute arbeiten 80 Wissenschaftler am Erlangen Centre for Astroparticle Physics (ECAP) u. a. an zwei Projekten auf der europäischen Roadmap zukünftiger Großforschungsprojekte.

Der Ansatz, mithilfe von Teilchen etwas über das Universum zu lernen, ist schon fast einhundert Jahre alt. Bereits 1912 entdeckte der österreichische Physiker Victor Hess die kosmische Strahlung, indem er durch abenteuerliche Ballonfahrten nachwies, dass die elektrische Leitfähigkeit der Luft in großer Höhe ansteigt – verursacht durch Strahlung aus dem Weltraum.

Extrem großes Teleskop: Das E-ELT

Europas Griff nach den Sternen heißt etwas fantasielos E-ELT: Nach dem VLT (Very Large Telescope) soll das „European Extremely Large Telescope“ kommen. In der Tat geht der geplante 42-Meter-Spiegel weit über die Größe der größten heutigen Teleskope hinaus. Werden alle technischen Hürden gemeistert, ermöglicht das E-ELT einen einmalig scharfen Blick ins All, vor allem im Infrarotbereich. Die frühesten Objekte im Universum, supermassive Schwarze Löcher, erdähnliche Exoplaneten, die Natur der Dunklen Materie – in den zentralen Forschungsthemen der Astrophysik wird das E-ELT einen enormen Fortschritt ermöglichen und mit unerwarteten Entdeckungen für Überraschungen sorgen. Bis voraussichtlich 2018 müssen sich die Astronomen allerdings gedulden, bereits jetzt laufen aber mehrere Machbarkeitsstudien für die Instrumentierung des E-ELT.



Im Gespräch: Prof. Dr. Johannes Blümer
Wie kam es zur Erweiterung der Verbundforschungslandschaft um die Astroteilchenphysik?

Blümer: Seit den 1980er-Jahren fand eine zunehmend intensive Verzahnung von Teilchenphysik mit Astrophysik, Astronomie

und Kosmologie statt. Beträchtlichen Anteil hatte z. B. die Supernova-Explosion von 1987 in der Großen Magellanschen Wolke, bei der erstmals nicht nur Licht, sondern auch Neutrinos nachgewiesen wurden. Zunächst eher formlos wurde auf einem Workshop 1999 in Zeuthen die Frage diskutiert, ob es ein neues Fachgebiet, die Astroteilchenphysik, geben sollte, mit der Konsequenz einer ersten Fördermöglichkeit. Nachfolgend wurde das Programm Astroteilchenphysik in der Helmholtz-Gemeinschaft geschaffen, das zusammen mit den Aktivitäten in der Max-Planck-Gesellschaft das Rückgrat der Astroteilchenphysik auch für größere Investitionen bildet und den Universitäten sehr signifikante Beiträge zu diesen Forschungen ermöglicht.

An welchen Großgeräten wird auf diesen Gebieten an was geforscht?

In der laufenden Förderperiode 2008–2011 sind 18 Universitäten beteiligt. Die Forschungsgebiete und die dafür eingesetzten sieben Großgeräte sind die Hochenergie-Gammaastronomie mit den Teleskopen H.E.S.S. und MAGIC, die kosmische Strahlung mit dem Pierre-Auger-Observatorium, die Hochenergie-Neutrinoastrophysik mit IceCube und ANTARES sowie die Neutrinoastrophysik mit den Experimenten KATRIN und GERDA.

Kommen die beteiligten Wissenschaftler und Doktoranden eher aus der Astrophysik oder der Teilchenphysik?

Die Zahl der Forscher mit einem Hintergrund aus der Teilchenphysik überwiegt, aber auch

aus der Astrophysik/Astronomie und Kernphysik sind Bewegungen zu verzeichnen. Inzwischen gibt es eine zunehmende Zahl junger Wissenschaftler, die von Beginn an im interdisziplinären Umfeld der Astroteilchenphysik aufgewachsen sind.

Johannes Blümer forscht an der Universität Karlsruhe und am Forschungszentrum Karlsruhe und ist Vorsitzender des Komitees für Astroteilchenphysik.

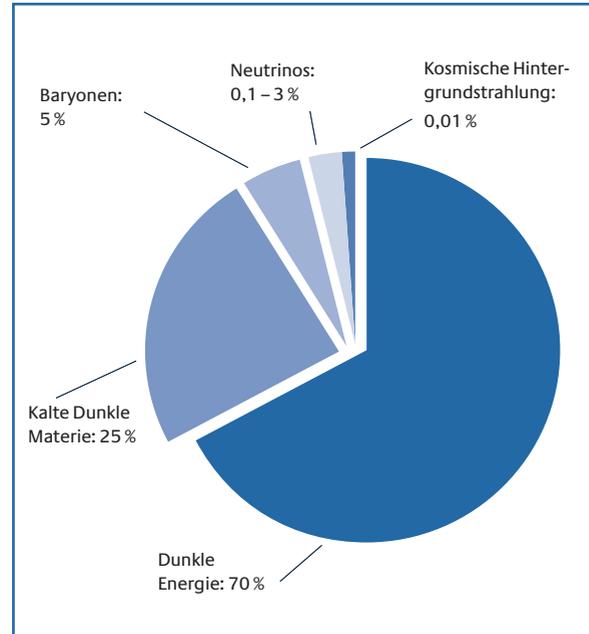
Heute weiß man, dass die kosmische Strahlung vor allem aus Atomkernen besteht, die teilweise fast so viel Bewegungsenergie wie ein Tennisball beim Aufschlag besitzt! Doch welche kosmischen Beschleuniger hier am Werk sind, ist noch weitgehend unbekannt – die Herkunft der energiereichsten Teilchen im Universum zählt deshalb zu den Schlüsselfragen der modernen Astroteilchenphysik. Mit einer neuen Generation von Messinstrumenten, wie dem Pierre-Auger-Observatorium, will man die rätselhaften Teilchen in Zukunft untersuchen. Auf einer Fläche von 3000 km² sind in der argentinischen Pampa 1600 Wassertanks aufgestellt, mit denen sich die Lawinen von Sekundärteilchen nachweisen lassen, die von den kosmischen Teilchen in der Erdatmosphäre ausgelöst werden. 24 weitere Teleskope mit je 12 Quadratmetern Spiegelfläche beobachten zusätzlich die Leuchtspur der Luftschauer.



Das Pierre-Auger-Observatorium ist ein Hybrid-Detektor. Im Vordergrund sieht man einen der 1600 Wassertanks zum Nachweis von Sekundärteilchen aus der kosmischen Strahlung, auf dem Hügel steht einer der Fluoreszenzdetektoren.

Auch die hochenergetische Gammastrahlung aus dem All lässt sich auf der Erde beobachten. Die Atmosphäre selbst dient ihr als eine Art Detektor, der kurz aufblitzt, wenn ein Gammateilchen eindringt. Ein drittes großes Forschungsgebiet der Astroteilchenphysik betrifft die Neutrinos, die völlig ungehindert die Atmosphäre durchdringen – leider fast immer auch die Detektoren, die sie nachweisen sollen. Auch Neutrinoastronomen brauchen deshalb große Geräte, um mit diesen „flüchtigen“ Teilchen Wissenschaft betreiben zu können.

Die Astroteilchenphysik profitiert von den Synergien mit Teilchenphysik und Astrophysik „und von dem Aufeinandertreffen zweier Kulturen“, sagt Prof. Dr. Christian Stegmann aus Erlangen. „Die Astronomen lernen von den Teilchenphysikern das Forschen in großen Kollaborationen, umgekehrt sehen die Teilchenphysiker, dass es auch in kleineren Gruppen geht.“ Das spricht viele Studenten an: Um wissenschaftlichen Nachwuchs muss sich die Astroteilchenphysik keine Gedanken machen.



Nur 5% der Materie im Universum haben eine bekannte Zusammensetzung. Dominiert wird die kosmische Materie hingegen von der Dunklen Materie, deren Entschlüsselung eine der großen Aufgaben der Astronomie ist. Noch rätselhafter ist die Dunkle Energie, welche die Expansion des Universums beschleunigt. Auch über ihre Natur gibt es bisher nur Spekulationen.



Im November 2006 bewältigte die zentrale Einheit des Karlsruher Neutrinoexperimentes KATRIN, das Hauptspektrometer, nach einer 8800 km langen Reise die letzte und schwierigste Etappe auf dem Weg ins Forschungszentrum Karlsruhe. KATRIN untersucht den Betazerfall von Tritium und soll daraus die Masse des Elektron-Neutrinos bestimmen – und zwar eine Größenordnung präziser als die Vorgängerexperimente. Für die Kosmologie ist es sehr wichtig, die Absolutmassen der Neutrinos zu kennen.

FORS – Das Arbeitspferd am Very Large Telescope

1100 Publikationen seit Dienstantritt 1999 – die umfangreiche wissenschaftliche Ausbeute beschreibt am besten den Erfolg „eines der attraktivsten Instrumente am Very Large Telescope (VLT) des European Southern Observatory (ESO)“, so Prof. Dr. Ralf Bender, dessen Münchner Institut die Elektronik und große Teile der Software zu FORS beisteuerte. Zwei Exemplare, FORS 1 und 2, sind am VLT auf dem Cerro Paranal in der chilenischen Atacamawüste im Einsatz, „man bräuchte jedoch fünf mal so viele Geräte, um die Beobachtungswünsche aus aller Welt befriedigen zu können.“ Jedoch: Ohne Fleiß kein Preis! Die Münchner Astronomen und ihre Kollegen aus Göttingen (zuständig für die Mechanik) und Heidelberg (Optik) sowie die beteiligten Experten der ESO haben 180 Mannjahre Arbeit in das Instrument gesteckt, über vier Förderperioden der Verbundforschung hinweg.

FORS ist Spektrograph, Kamera und Polarimeter in einem – und damit „ein Arbeitspferd der ESO in allen Bereichen der Astrophysik“, sagt Projektleiter



Trotz seiner mächtigen Dimensionen (Höhe: 3 m, Gewicht: 2,5 Tonnen) verschwindet das FORS1-Instrument am Kueyen-Teleskop des VLT fast unterhalb der Trägerkonstruktion des Hauptspiegels, der einen Durchmesser von 8,2 m aufweist.

Prof. Dr. Immo Appenzeller von der Landessternwarte Heidelberg. Er ergänzt: „Zum damaligen Zeitpunkt gab es auch an den amerikanischen Großteleskopen kein vergleichbares Instrument.“

Zu den wissenschaftlichen Highlights von FORS zählt ohne Zweifel das FORS Deep Field, eine drei Nächte lange Belichtung eines kleinen Himmelsausschnitts, auf dem viele tausend Galaxien versammelt sind. Die ältesten sind 12 Milliarden Jahre alt, also relativ kurz nach dem Urknall entstanden. Zahlreiche dieser Galaxien wurden nun eingehender untersucht, um anhand der Rotverschiebung die Entfernung zu ermitteln. Sie spielt eine grundlegende Rolle für die Beantwortung wichtiger astronomischer Fragen: Wie entwickelt sich die Leuchtkraft von Galaxien? Wie altern sie? Wie läuft die Sternentstehung ab? FORS bediente sich allerdings nicht der klassischen Spektroskopie an Spektrallinien, um die Rotverschiebung zu messen, sondern setzte aus Aufnahmen bei fünf optischen Wellenlängen und zwei infraroten, die ein anderes Instrument beisteuerte, einen spektralen, also farbigen „Gesamteindruck“ einer Galaxie zusammen, aus dessen Eigenschaften sich die Rotverschiebung photometrisch ablesen lässt, und zwar erstaunlich genau: Aus 250 aufgenommenen Spektren wurden photometrische Rotverschiebungsdaten für 250 andere abgeleitet – auf 3% genau. Der große Vorteil der Entfernungsbestimmung ohne Spektroskopie besteht darin, dass sie wesentlich schneller ist. Kein unwichtiger Faktor bei dem Gedränge, das an den großen Teleskopen dieser Welt herrscht. „Früher habe ich an kleinen Teleskopen zehn Beobachtungsnächte beantragt und manchmal zwei Wochen bekommen“, erinnert sich Ralf Bender, „an den VLTs werden bereits einzelne Nächte an verschiedene Gruppen verteilt.“ Trotzdem braucht man vor allem beim Studium seltener Objekte Aufnahmen möglichst vieler Galaxien.

Dass beides geht – gute Statistik mit wenig Zeit –, zeigt die Weitwinkelkamera OmegaCam, ein weiteres Instrument am VLT, an dem München und Göttingen beteiligt sind; das dafür vorgesehene Teleskop VST soll 2009 seinen Betrieb aufnehmen. Die Kamera besteht aus 32 CCDs und kann in einer Belichtung ein hundertmal größeres Himmelsareal als FORS abbilden. Obwohl das Teleskop, an dem OmegaCAM betrieben wird, kleiner ist als das VLT, vermag die Kamera effizienter großflächige Himmelsdurchmusterungen durchzuführen als

FORS und damit seltene Objekte besser aufzuspüren, die dann mit FORS oder anderen Instrumenten am VLT detaillierter untersucht werden können.

In den Münchner Laboren wird auch bereits seit einigen Jahren an dem neuen Infrarot-Spektrographen KMOS gearbeitet, der dank einer ausgeklügelten Optik und Steuerung 5000 Spektren „auf einen Streich“ aufnehmen kann und Beobach-

tungen bei noch höheren Rotverschiebungen als mit FORS erlaubt. Eine der technischen Herausforderungen hierbei ist, dass KMOS bei minus 200 Grad Celsius funktionieren muss, und zwar reibungslos. Jeder Fehler im späteren Betrieb, zu dessen Behebung das ganze Instrument aufgewärmt werden muss, kostet viele Wochen Beobachtungszeit – und die ist bekanntlich ein kostbares Gut.



Das FORS Deep Field, dessen Feldgröße etwa sieben Prozent der Vollmondfläche entspricht, entstand im Herbst 1999 mit FORS1 und ist das Ergebnis dreier Belichtungen mit unterschiedlichen Filtern (Gesamtbelichtungszeit mehr als 20 Stunden). Bis auf wenige Ausnahmen sind alle Punkte und Flecken auf dieser Ausnahme Galaxien, die aus bis zu hunderten von Milliarden von Sternen bestehen. Die ältesten Galaxien auf der Aufnahme (die kleinsten und dunkelsten) sind 12 Milliarden Jahre alt, also relativ kurz nach dem Urknall entstanden.

LUCIFER – Lichtbringer

Das Large Binocular Telescope (LBT)

Das Large Binocular Telescope auf dem 3190 Meter hohen Mount Graham im US-Bundesstaat Arizona ist eines der herausragenden wissenschaftlich-technischen Projekte der modernen astronomischen Forschung. Der Name des Teleskops, das in internationaler Kooperation betrieben wird, ist Programm: Das Fernrohr verfügt über zwei riesige Sammelspiegel mit jeweils 8,4 Metern Durchmesser, die – auf einer gemeinsamen Montierung installiert – gleichzeitig auf ferne Himmelskörper ausgerichtet werden, ähnlich wie ein riesiges Fernglas. Die Oberflächen der Spiegel sind dabei auf 20 Nanometer genau poliert: ein LBT-Spiegel – vergrößert auf die Fläche des Bodensees – hätte nur „Wellen“ von einem fünftel Millimeter Höhe! Die Hauptspiegel sind nicht massiv, sondern wabenartig aufgebaut, und wiegen deshalb trotz ihrer Größe nur jeweils 16 Tonnen. Die viel dickeren Spiegel klassischer Teleskope würden in dieser Dimension etwa 100 Tonnen wiegen und den Bau eines Fernrohrs dieser Größenordnung unmöglich machen. Durch die Vereinigung der Strahlengänge der beiden Einzelspiegel sammelt das LBT so viel Licht wie ein Teleskop mit einem Spiegeldurchmesser von 11,8 Metern und erreicht dank adaptiver Optik die Auflösung eines 23-Meter-Teleskops.



In der römischen Mythologie stand Lucifer noch für die poetische Umschreibung des Morgensterns, also der Venus. Erst die Kirchenväter setzten ihn mit dem Teufel gleich. Der steckt zwar bei jedem wissenschaftlichen Projekt im Detail, doch die Väter des Instruments LUCIFER hatten bei der Namensgebung vielleicht die wörtliche Übersetzung im Hinterkopf: „Lichtbringer“, aus dem Lateinischen „lux“ und „ferre“. Gibt es einen passenderen Namen für ein astronomisches Gerät? Nüchtern betrachtet ist LUCIFER jedoch einfach nur die Abkürzung für den unhandlichen Wörterwurm LBT Near Infrared Spectroscopic Utility with Camera and Integral Field Unit for Extragalactic Research, in dem jedoch Sinn und Zweck von LUCIFER schon anklingen: Kamera und Spektrograf für den nahen Infrarotbereich, um weit entfernte Galaxien beobachten zu können. Im Sommer 2008 wurde die erste Ausgabe von LUCIFER, das von einem Konsortium deutscher Institute unter Leitung der Landessternwarte in Heidelberg gebaut wurde, in der Neckarstadt ausführlich und erfolgreich getestet, bevor es anschließend nach Arizona verfrachtet wurde. Dort müssen jetzt Teleskop und Instrument zueinanderfinden: eine mühsame Anpassungsarbeit, bis das Zusammenspiel reibungslos funktioniert. LUCIFER II für den zweiten Spiegel des LBT wird 2009 folgen.

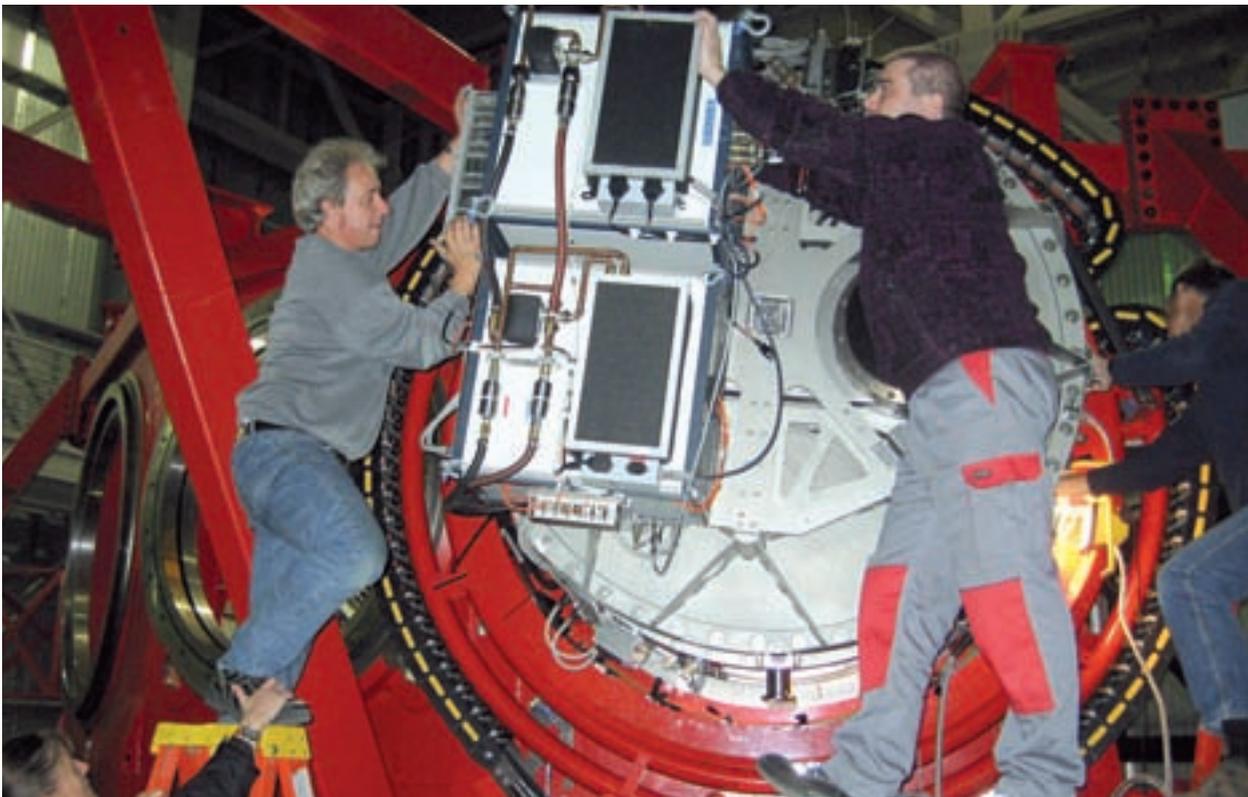
LUCIFER ist ein typisches Verbundforschungsprojekt: Von den ersten Planungen bis zum ausgereiften Instrument verging gut ein Jahrzehnt. Die physikalischen Vorgaben waren relativ klar umrissen: LUCIFER soll der Erforschung der Strukturbildung im frühen Universum dienen, also weit entfernte Galaxien ins Visier nehmen. Da sich diese Galaxien sehr schnell von uns weg bewegen – je schneller, desto weiter entfernt –, ist die Wellenlänge ihres Lichts in den Infrarotbereich verschoben. Entsprechend beobachtet LUCIFER also im Infraroten, zwischen 1 und 2,5 Mikrometern Wellenlänge. Die zweite wichtige Anforderung an LUCIFER war, viele Objekte gleichzeitig beobachten zu können, um Zeit zu sparen. Das Licht schwach leuchtender Galaxien muss man etwa eine halbe Nacht lang sammeln; für 200 Galaxien, eine nach der anderen anvisiert, bräuchte man also 100 Nächte. Beobachtet man allerdings 50 Galaxien gleichzeitig, ist dasselbe Programm in zwei Nächten abgehakt – eine enorme Beschleunigung. In die Optik von LUCIFER werden

deshalb vorgestanzte Masken gehalten, die jeweils die interessanten Galaxien eines bestimmten Himmelsfeldes herausfiltern – für jedes Objekt ein Spalt. Ein Roboter mit einem Greifarm tauscht die Maske aus, wenn das nächste Himmelsfeld dran ist.

Nun ist Infrarotstrahlung jedoch Wärmestrahlung, die unweigerlich auch von LUCIFER selbst abgegeben und jede Messung unmöglich machen würde – „als wollte man den Himmel beobachten und das Licht ist noch an“, veranschaulicht Prof. Dr. Andreas Quirrenbach, Direktor der Landessternwarte Königstuhl, das Problem. Also muss das Instrument in einen Kühlschrank mit einer Temperatur von minus 200 °C gesteckt werden – und nicht nur die Kamera, auch der Roboter und das Maskenmagazin. Diese Notwendigkeit stellte die technische Herausforderung für LUCIFER dar: Alle Komponenten müssen kältefest sein und die Motoren ohne Öl laufen, die Wärmeausdehnung der Materialien muss bedacht werden usw. „Das alles zu entwickeln und zu testen,

war schon sehr aufwendig“, so Quirrenbach. Auch der Tausch eines ganzen Magazins gegen ein neues findet in der Kälte statt, um den Beobachtungsprozess nicht zu unterbrechen. Das neue Magazin, durch einen eigenen Kryostaten gekühlt, wird dazu an die Kältekammer von LUCIFER angedockt und nimmt durch eine Schleuse den Platz des Vorgängers ein. Ein technisch sehr anspruchsvolles Unterfangen, doch gerade die Spaltmasken „machen das Instrument einmalig“, führt er weiter aus.

LUCIFER kann extrem weit entfernte Galaxien mit Rotverschiebungen bis $z=10$ beobachten, das „täglich Brot“ liegt aber im Bereich $z=3-5$. Da LUCIFER viele Galaxien auf einmal beobachten kann, verspricht man sich von dem Instrument neue Erkenntnisse über die Strukturentstehung im Universum und hofft, mit den Daten die Entwicklung von Galaxien nachzeichnen zu können. Im Großen und Ganzen versteht man diese Prozesse, doch viele Details sind noch unbekannt.



Nach zahlreichen Tests wurde LUCIFER 1 2008 am LBT installiert. Mit LUCIFER, das von einem Konsortium deutscher Institute unter Leitung der Landessternwarte in Heidelberg gebaut wurde, können sowohl Abbildungen als auch Spektren aufgenommen werden. In der Fokalebene des Instruments können Langspalt- und Mehrspalt-Masken für Einzel- und Multiobjekt-Spektroskopie installiert werden.

ANTARES – Von oben oder von unten?

Neutrinos und Walgesänge

Neutrinos kann man sogar hören! Denn bei extrem hohen Energien können Neutrinos durch ihre Wechselwirkung mit dem Wasser ein akustisches Signal erzeugen, das mit so genannten Hydrophonen – Unterwasser-Mikrofonen – detektiert werden kann, und zwar über mehrere Kilometer hinweg. Die Erlanger Gruppe hat ein System aus 36 Hydrophonen am ANTARES-Detektor installiert, horcht damit aber nicht nur nach Neutrinos, sondern erforscht generell die akustischen Untergrundbedingungen in der Tiefsee. Da die Hydrophone ständig Daten an Land senden, eignen sie sich bestens für Langzeitbeobachtungen der Umgebung, beispielsweise von Walen. In einer Zusammenarbeit mit französischen Meeresforschern sollen die Signale der Meeressäuger identifiziert und ihre Unterwasserrouten rekonstruiert werden.

Wer Neutrinos beobachten will, braucht Geduld und vor allem einen großen Detektor aus einem geeigneten Material. Günstig und überraschenderweise auch geeignet ist beispielsweise Wasser. Und wo gibt es viel Wasser? Im Meer.

Das Experiment ANTARES ist deshalb im Mittelmeer beheimatet. Vor Marseille fand man eine geeignete Stelle: Nur 25 km von der Küste entfernt, trotzdem 2.500 m tief, der Grund aber flach. ANTARES nutzt das Wasser, um Myon-Neutrinos zu suchen: Stößt ein solches Neutrino mit einem Atom des Wassers zusammen, erzeugt es ein Myon, das anschließend durchs Wasser läuft und entlang seiner Spur kurze Lichtblitze abgibt. Nach diesen Lichtblitzen hält ANTARES Ausschau. Als Kameras dienen 900 Photomultiplier, die an 12 langen Leinen ins Wasser gelassen und am Boden verankert wurden. Jeder dieser Strings trägt auf 25 Stockwerken im vertikalen Abstand von 14,5 m jeweils drei Photomultiplier und einen zentralen Titanzylinder, der die Steuerungs- und Ausleseelektronik enthält.

Aus der Abfolge der Lichtblitze, die von den optischen Sensoren registriert werden, kann die Spur der Myonen rekonstruiert werden. Dass sich ANTARES auf Myon-Neutrinos konzentriert, hat keine kosmologischen, sondern eher praktische

Gründe. „Neutrinos oszillieren ja – welchem Typ ein Neutrino bei seiner Entstehung angehörte, wissen wir gar nicht“, erläutert Prof. Dr. Gisela Anton, Physikerin in Erlangen und maßgeblich an ANTARES beteiligt. „Myonen machen eine ordentliche Spur von einigen Kilometern Länge im Wasser, deswegen haben wir sie im Visier.“



Ein Mitarbeiter des ECAP montiert ein Hydrophon auf ein akustisches Stockwerk von ANTARES. Diese Hydrophone, in Erlangen entwickelt, spüren die akustischen Signale auf, die von den Neutrinos im Wasser erzeugt werden.

Doch nur wenige Myonen stammen tatsächlich von Neutrinos – eine Million Mal mehr entstehen in der Erdatmosphäre durch die kosmische Strahlung. Wie kann man sie auseinanderhalten? Die Richtung macht's: Myonen aus der Atmosphäre können nur von oben ins Wasser kommen, da alle anderen von der Erde abgeschirmt werden. Myonen, deren Spur von unten kommt, können also nur von Neutrinos herrühren, da Neutrinos die einzigen Teilchen sind, die den Erdkörper problemlos passieren können.

Prof. Dr. Gisela Anton, Universität Erlangen



„Der deutsche Beitrag zu ANTARES ist ein Paradebeispiel für den nachhaltigen Erfolg der Verbundforschung die den Einstieg in das Projekt ermöglicht hat und damit das Saat Korn in der Universität Erlangen für die Etablierung der Astroteilchenphysik und des Erlangen Centre for Astroparticle Physics ECAP legte.“

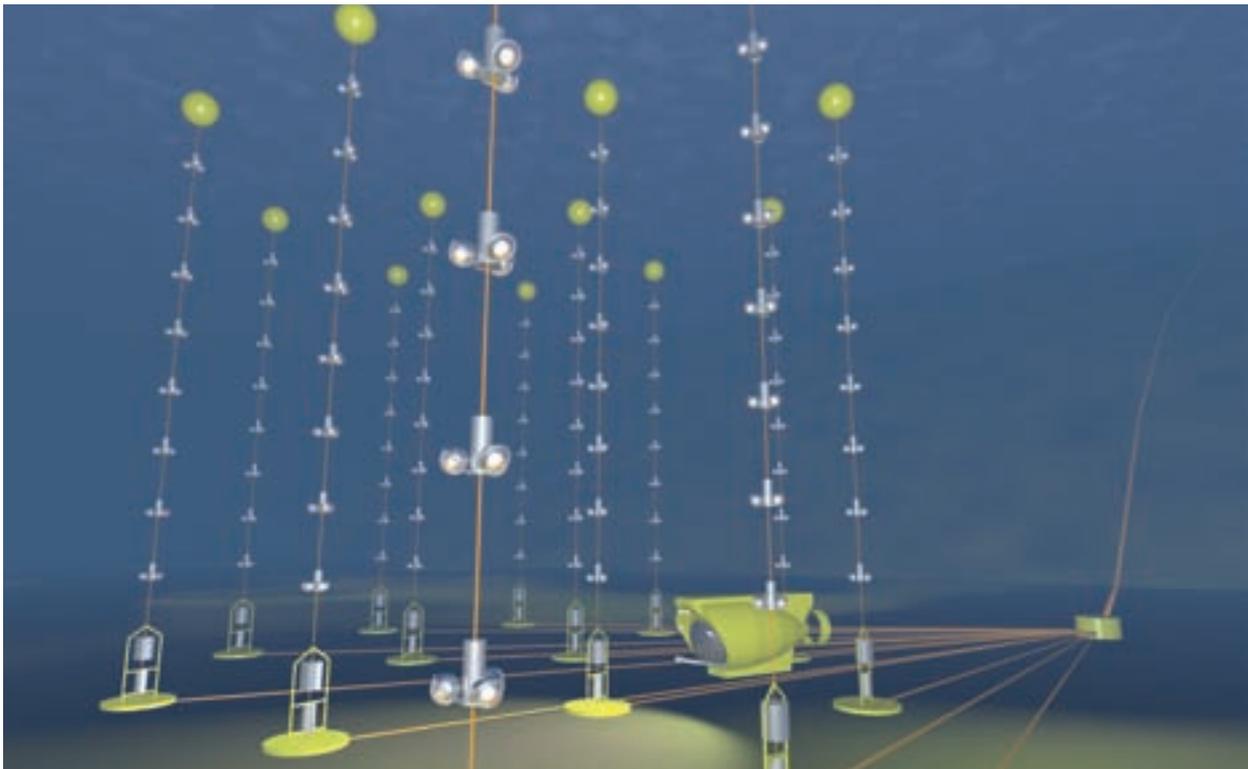
Inzwischen hat ANTARES gezeigt, dass man Neutrinos im Meerwasser tatsächlich beobachten kann – anfangs galt es jedoch, einige Hindernisse zu überwinden. Wir hatten beispielsweise eine schlechte Übertragungsqualität bei den Daten, die wir uns nicht erklären konnten“, erinnert sich Gisela Anton. „Wir zogen die Strings wieder an Land und schauten in die Zylinder, doch alles sah normal aus. Schließlich bauten wir eine Kamera ein und konnten dann sehen, was unter Wasser passiert: Der enorme Wasserdruck von 250 bar in 2500 m Tiefe quetschte aus dem Kabel, das in den Elektronikzylinder führt, die innen liegenden optischen Fasern wie bei einer Zahnpastatube heraus.“ Eine weitere Herausforderung bestand darin, dass sich die Strings im Wasser wie Schilfrohre bewegen, man aber von jedem Photomultiplier genau wissen muss, wo er sich befindet. Die Erlanger ANTARES-Gruppe entwickelte deshalb eine Prozedur zur Positionsbestimmung, die Kompass, Neigungsmesser und akustische Entfernungsbestimmung kombiniert – und das mit einer Genauigkeit von 2 cm!

Um kosmische Neutrinos nachzuweisen, ist ANTARES aber vermutlich zu klein. Erst das im Mittelmeer ge-

plante Neutrinoobservatorium KM3NeT wird mit mehr als einem Kubikkilometer Detektorvolumen wohl eine genügende Anzahl Neutrinos beobachten und damit astrophysikalische Forschung machen können. KM3NeT wird von Professor Uli Katz in Erlangen koordiniert und steht auf der ESFRI-Roadmap zentraler europäischer Forschungsvorhaben – bereits jetzt ein großer Erfolg für das Projekt.



Die Glaskugeln, in denen sich die Photosensoren befinden, müssen einem Druck von ca. 250 bar standhalten, der in der Meerestiefe von 2500 Metern herrscht.



Skizze des ANTARES-Detektors. In insgesamt 900 Glaskugeln sind Photosensoren untergebracht, mit denen man das Licht räumlich und zeitlich messen kann, das durch Neutrinoreaktionen hervorgerufen wird.

H.E.S.S. – Gammajäger in der Wüste

Im normalen Leben ist es wichtig, Dinge ab und zu in einem anderen Licht zu sehen. Astronomen nehmen das schon lange wörtlich und erschlossen sich im 20. Jahrhundert neben dem optischen Bereich auch praktisch alle anderen Bereiche des elektromagnetischen Spektrums für ihre Arbeit, z. B. die hochenergetische Gammastrahlung. Sie zeugt von den energiereichsten Vorgängen im Universum, von gewaltigen Explosionen, Sternkollisionen und aktiven Galaxien. Da Gammastrahlung von der Erdatmosphäre jedoch abgefangen wird, wurde Gammaastronomie zunächst nur mit Weltraumteleskopen betrieben. In jüngerer Zeit können die Wissenschaftler aber Gammastrahlung auch indirekt auf dem Erdboden detektieren. Die hochenergetischen Gammaphotonen erzeugen in großer Höhe nämlich eine Lawine von Teilchen, die kurze Lichtblitze abstrahlen. Diese sind für das bloße Auge zwar viel zu schwach, für große Spiegelteleskope jedoch nicht.

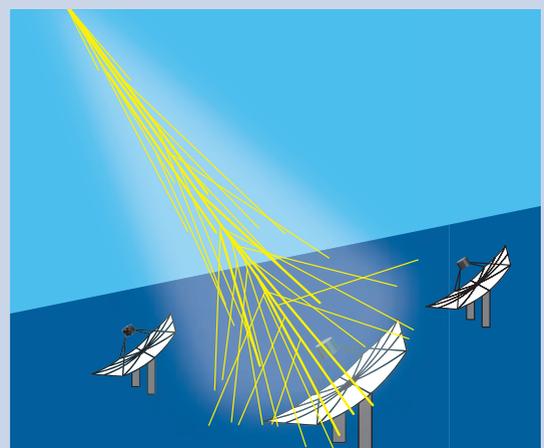
Die vier Teleskope von H.E.S.S. in der Wüste Namibias repräsentieren bereits die dritte Instrumentengeneration in dem jungen Forschungszweig. Gegenüber früheren Teleskopen ist H.E.S.S. wesentlich empfindlicher: Brauchte man 1989 noch 50 Stunden, um den Krebsnebel im Gammalicht zu erkennen, erledigt H.E.S.S. diese Aufgabe in 30 Sekunden. Die große Empfindlichkeit erlaubt es H.E.S.S., viele Gammaquellen am Himmel zu orten, das große Sichtfeld – es entspricht der zehnfachen Fläche des Mondes – macht das Teleskop zudem geeignet für ausgedehnte Strukturen. Die Verwendung von vier Teleskopen in jeweils 120 m Abstand ermöglicht es, auch die Richtung der Gammastrahlung zu bestimmen – analog der menschlichen Fähigkeit, mit zwei Augen stereoskopisch zu sehen.

H.E.S.S.

H.E.S.S. macht ausgezeichnete Wissenschaft – in jeglicher Beziehung: 2007 erhielt die Kollaboration den Descartes-Forschungspreis der Europäischen Kommission. Damit wurde die beeindruckende Erfolgsgeschichte von H.E.S.S. gewürdigt.

Teilchenschauer und Tscherenkow-Licht

Während das Licht von Sternen die Erdatmosphäre mehr oder weniger ungehindert durchdringt und somit vom Erdboden aus beobachtet werden kann, stoßen Gammastrahlen aus dem Kosmos mit den Atomen in der Erdhülle zusammen und werden absorbiert, bevor sie die Erdoberfläche erreichen. Will man trotzdem Gammaastronomie betreiben, kann man Satelliten einsetzen – für die interessante, aber sehr selten auftretende hochenergetische Gammastrahlung bräuchten Satelliten jedoch Tausende von Jahren, um genügend Daten zusammenzutragen. Teleskope wie H.E.S.S. nutzen hingegen die Absorption von Gammateilchen in der Erdatmosphäre, weil dabei eine Kaskade von Sekundärteilchen freigesetzt wird. Während diese durch die Luft flitzen, emittieren sie ein schwaches bläuliches Licht, die sogenannte Tscherenkow-Strahlung, welche am Erdboden wie ein riesiger Pointer ein Gebiet mit ca. 250 Metern Durchmesser „ausleuchtet“. Die Blitze dauern jedoch nur wenige Milliardstel Sekunden und sind für das Auge unsichtbar. Die Tscherenkow-Teleskope von H.E.S.S. können sie jedoch „sehen“. Da sie mehrere „Bilder“ aufnehmen, kann sogar die Richtung des ursprünglichen Gammateilchens rekonstruiert werden.



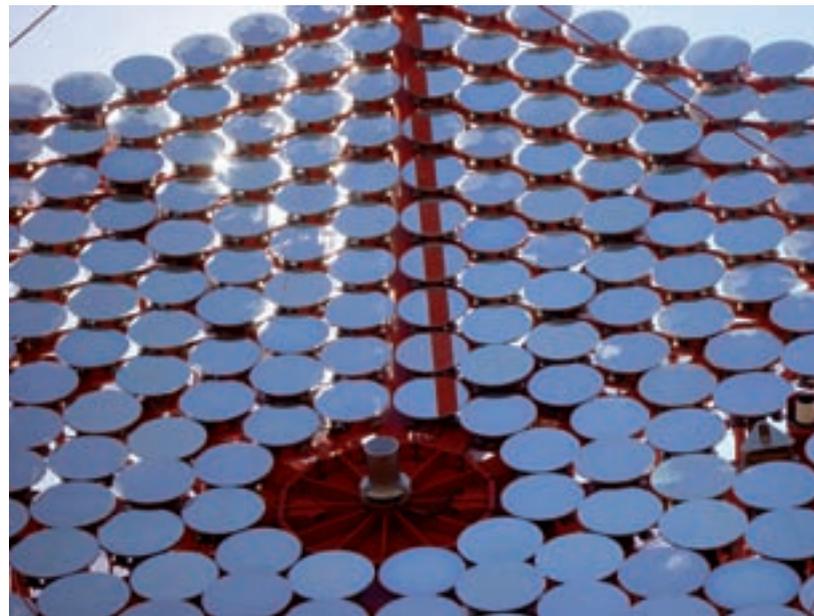


Das H.E.S.S.-System besteht aus vier Teleskopen, die in einem Quadrat angeordnet sind. Es ist auf dem Khomashochland in Namibia stationiert, von wo aus sich der südliche Himmel hervorragend beobachten lässt.

Seit seiner Inbetriebnahme 2004 hat H.E.S.S. über 50 zuvor unbekannte Gammaquellen entdeckt. Einige von ihnen lassen sich mit Supernovae identifizieren, etliche sind Pulsare, doch bei etwa einem Dutzend Quellen ist die Ursache noch ungeklärt. Manche Gammastrahlungsquellen sind auch Röntgenquellen, doch einige wurden bisher in keinem anderen Spektralbereich beobachtet – handelt es sich vielleicht um neue, unbekannte Himmelskörper? „Wir stehen hier erst am Anfang, denn mit H.E.S.S. erschließen wir uns einen Energiebereich, den bisher niemand sehen konnte“, erläutert Prof. Dr. Werner Hofmann, Direktor am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg und Leiter des internationalen H.E.S.S.-Projekts. Mit den H.E.S.S.-Teleskopen öffnet sich der Astrophysik nun ein ganz neues Fenster hinaus ins All.

Mehrere deutsche Universitäten sind durch die Verbundforschung an H.E.S.S. beteiligt – „ein sehr wichtiger Beitrag“, betont Hofmann. „Eine ganze Menge Expertise und Manpower ist in das Projekt geflossen und hat es dadurch erst ermöglicht.“ Aus Hamburg stammt die mikrometeregenaue Steuerung der 380 Segmente, aus denen ein Sammelspiegel wie ein Facettenauge zusammengesetzt ist. Bochum lieferte u. a. die begleitende theoretische Modellierung innerhalb der Kollaboration, die Tübinger Arbeitsgruppe entwickelte spezielle Komponenten für die Erweiterung von H.E.S.S. um ein

fünftes zentrales Teleskop. Dass eine der Wurzeln der Astroteilchenphysik in der Hochenergiephysik liegt, zeigt die gesamte Datenerfassung und -verarbeitung von H.E.S.S., die von Berlin und Erlangen geleistet wird: Die Forscher lernten ihr Know-how am LHC und stecken es nun in die Gammaastronomie. „Wir setzten ein modulares Datensystem auf, das die Komponenten mehrerer Gruppen integriert – von der Spiegelsteuerung bis zur Wetterstation –, 180 verschiedene Prozesse miteinander kommunizieren lässt und die Datenanalyse besorgt“, fasst Prof. Dr. Christian Stegmann, Computing-Experte in Erlangen, das Ergebnis zusammen. Vor allem bei der Auswertung lerne die Astronomie von der Teilchenphysik: „Wie analysiere ich die Daten statistisch richtig?“ Dieser Wissenstransfer schlägt sich in einer hohen Dateneffizienz von 90 Prozent nieder, für Prof. Dr. Christian Stegmann jedoch kein Ruhekiten: „Wir arbeiten intensiv daran, dass wir auch noch die letzten 10% schaffen.“ Die Pflegeleichtigkeit des Systems kommt nun der Erweiterung von H.E.S.S. zugute: „Für das fünfte Teleskop müssen wir nur einige Datenbanktabellen ändern – das war’s.“



Jeder der vier Spiegel ist aus 380 Facetten zusammengesetzt, die auf wenige tausendstel Millimeter genau justiert werden können.

MAGIC – Ein neues Fenster zum All

Während das H.E.S.S.-Teleskopsystem den südlichen Nachthimmel und damit vor allem unsere Galaxis, die Milchstraße, durchmustert, werden mit dem MAGIC-Teleskop auf La Palma Quellen von Gammastrahlung am nördlichen Himmel beobachtet. Dort öffnet sich das Fenster zum extragalaktischen Raum, wo sich astronomische Quellen in unvorstellbar großen kosmologischen Entfernungen befinden. Die Gammastrahlung verrät sich durch kurze, blaue Lichtblitze in der Atmosphäre, die man auch mit empfindlichen Teleskopen auf der Erde wahrnehmen kann – obwohl sie sich kaum vom Nachthimmel abheben.

MAGIC besitzt das weltweit größte und empfindlichste Auge für den Gammabereich: 234 Quadratmeter misst sein Sammelspiegel, zusammengesetzt aus 900 einzelnen Facetten. Die „Bilder“, die es sieht, bestehen aus nur wenigen hundert Photonen in einem Energiebereich deutlich unterhalb 100 GeV, der bisher noch unerforscht ist, in dem aber der Schlüssel zum Verständnis von Dunkler Materie und Schwarzen Löchern liegen könnte. Die anderen

Erdteleskope haben untere Nachweisgrenzen bei deutlich höheren Energien, Satellitenexperimente hingegen sind nur bis zu einigen GeV vergleichbar empfindlich. Dadurch, dass MAGIC diese Lücke schließt, kann es noch weiter hinaus ins Universum blicken. „Viele neue Technologien mussten dafür entwickelt werden“, umreißt Prof. Dr. Karl Mannheim, dessen Würzburger Gruppe an MAGIC beteiligt ist, die Besonderheit des Gammateleskops, „etwa Photosensoren mit Know-how aus der Teilchenphysik.“ Die Effizienz der MAGIC-Detektoren, die auch in der Medizintechnik von Bedeutung sind, übertraf die zu seiner Bauzeit existierenden Grenzen; die Schwellenenergie zum Nachweis von Gammastrahlung konnte noch einmal um einen Faktor zwei gesenkt werden.

Die diamantgeschliffenen Einzelspiegel werden ständig programmgesteuert justiert, um beispielsweise Verformungen des Gerätes zu kompensieren. Außerdem sind sie beheizbar – können also nicht beschlagen – und vor allem leicht, denn als Material wurde Aluminium verwendet.



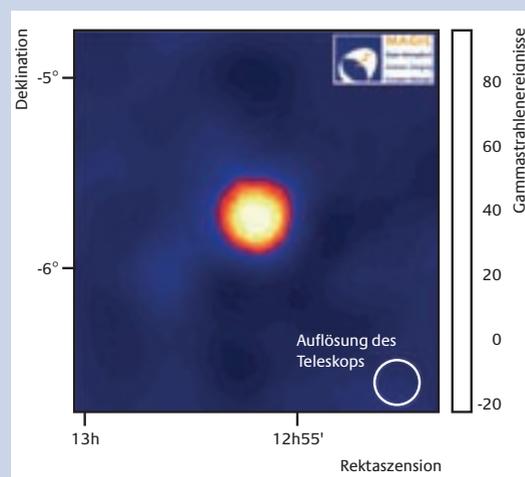
Das MAGIC-Teleskop auf La Palma ist das größte Luft-Tscherenkow-Teleskop. Ein leichtes und stabiles Gerüst aus Kohlefaser trägt den Detektor, dessen aktive Spiegeloberfläche 234 Quadratmeter groß ist, bestehend aus 900 einzelnen „Augen“. Eines der herausragenden Merkmale von MAGIC ist die kurze Reaktionszeit, mit der das Teleskop auf jeden Punkt am Himmel ausgerichtet werden kann.

Auch der Trägerrahmen des Spiegels ist wie bei einem modernen Rennrad aus ultraleichten Kohlefaserstäben aufgebaut. Diese Leichtbauweise ermöglicht eine enorm schnelle Ausrichtung des Teleskops und erhöht damit die Chance, so genannte Gamma Ray Bursts zu untersuchen. Seit einigen Jahren bilden diese unerwartet und nur kurz am Himmel aufleuchtenden Gammablitz ein zentrales Forschungsthema der Astrophysik. Sie strahlen innerhalb weniger Sekunden weit mehr Energie ab als eine ganze Galaxie. Die physikalischen Prozesse, die zum Auftreten eines solchen kosmischen Gammablitzes führen, sind bisher aber noch weitgehend unverstanden. Spezielle Weltraumteleskope wie Swift liegen nur auf der Lauer, Gamma Ray Bursts zu erwischen. „Meldet der Satellit ein Ereignis zur Erde, kann MAGIC innerhalb von Sekunden an die betreffende Stelle am Himmel manövrieren“, erläutert Karl Mannheim die Reaktionsschnelligkeit des Teleskops. Er und seine Mitarbeiter haben das innovative Antriebssystem entwickelt. Dass es den Praxistest bestehen konnte, wurde es erstmals am 13. Juli 2005 unter Beweis stellen: Bereits 20 Sekunden nach dem Alarm von Swift wurden die ersten hochenergetischen Ereignisse von MAGIC aufgenommen.

Um jetzt mit der inzwischen bewährten MAGIC-Technologie die Empfindlichkeit der Beobachtungen noch weiter zu steigern, hat es einen Zwilingsbruder bekommen, MAGIC-II, dessen „First Light“ Ende April 2009 gefeiert wurde. Gleichzeitig wird auch die MAGIC-I-Kamera erneuert. Ziel ist es, die beiden Kameras baugleich zu machen, damit die stereoskopische Beobachtung optimal wird. Durch den Stereoblick werden Ortsauflösung und Empfindlichkeit der Beobachtungen deutlich verbessert. Astronomische Quellen von Gammastrahlen können schärfer gesehen werden, und auch schwächere Quellen werden schon nach kurzer Beobachtungszeit sichtbar. Damit besteht die Chance, das Flackern der Strahlung zu beobachten, aus dem hervorgeht, dass die Strahlung ganz in der Nähe Schwarzer Löcher emittiert wird. Außerdem wollen die MAGIC-Forscher weitere Quellen finden – „wir wollen die Schallmauer von 100 Quellen durchbrechen“, so Karl Mannheim. „Wir haben bewiesen, dass entgegen früheren Vermutungen doch eine sehr große Zahl von Gammaquellen am Himmel existiert, wissen aber immer noch nicht so richtig, wie die kosmischen Teilchenbeschleuniger funktionieren.“ Man wird von MAGIC also noch einiges erwarten können.

Quasarbeobachtung mit MAGIC

Fünf Milliarden Jahre lang war die Gammastrahlung unterwegs, die MAGIC 2008 einfing, und hat dabei fast das halbe Universum durchquert. Sie stammt von dem Quasar 3C279, einer aktiven Galaxie mit einem Schwarzen Loch im Zentrum, das etwa eine Milliarde Sonnenmassen aufweist und alles verschluckt, was in seine Nähe kommt. Im Materiestrudel um das Schwarze Loch werden ungeheure Energien freigesetzt, unter anderem als Gammastrahlung. Dass diese auf der Erde angekommen ist, stellt allerdings ein Rätsel dar. Denn im Gegensatz zur Strahlung im sichtbaren Wellenlängenbereich stoßen die Gammaquanten mit den Photonen des extragalaktischen Hintergrundlichts wie zwei Teilchen zusammen und gehen dadurch nach und nach verloren. Die Beobachtung von MAGIC deutet somit darauf hin, dass die Dichte der Hintergrundstrahlung in kosmisch früher Zeit, bald nach der Entstehung der ersten Sterne, viel geringer gewesen sein muss, als bislang von den Kosmologen angenommen – ansonsten wäre die Gammastrahlung absorbiert worden.



3C279 im Gammalicht. Deutlich zu sehen, dass der Quasar dort die hellste Quelle ist. Dass die wegen ihrer Entfernung eigentlich punktförmige Quelle fast so groß wie der Vollmond erscheint, liegt an der begrenzten räumlichen Auflösung des Teleskops.

Abkürzungsverzeichnis

AGATA: Advanced Gamma Tracking Array, Gamma-spektrometer

ALICE: A Large Ion Collider Experiment, Experiment am LHC zur Erzeugung eines Quark-Gluon-Plasmas

ANTARES: Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental REsearch, ein Neutrino-Detektor im Mittelmeer

APEX: Atacama Pathfinder Experiment, ein Radioteleskop in der chilenischen Atacamawüste

ATLAS: A Toroidal LHC Apparatus, ein Teilchendetektor am LHC, mit dem u. a. nach dem Higgs-Boson gesucht wird

BESSY: Berliner Elektronenspeicherring-Gesellschaft für Synchrotronstrahlung, Forschungseinrichtung in Berlin, die inzwischen mit dem Hahn-Meitner-Institut zum Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie fusioniert ist; gleichzeitig Bezeichnung für den Elektronenspeicherring in Berlin-Adlershof

CBM: Compressed Baryonic Matter, Experiment bei FAIR zur Untersuchung hoch verdichteter Kernmaterie

CERN: Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, 1954 gegründete Großforschungseinrichtung bei Genf, die u. a. den neuen Teilchenbeschleuniger LHC betreibt

CMS: Compact Muon Solenoid, Detektor am LHC, der mit ähnlichen Aufgabenstellungen wie ATLAS betrieben wird

COSY: Cooler Synchrotron, Kühlersynchrotron am Forschungszentrum Jülich zur Beschleunigung von Protonen und Deuteronen

DESY: Deutsches Elektronen-Synchrotron, 1959 gegründetes Forschungszentrum in Hamburg, das mehrere Teilchenbeschleuniger betreibt

DKFZ: Deutsches Krebsforschungszentrum in Heidelberg, 1964 gegründetes Forschungszentrum

DPG: Deutsche Physikalische Gesellschaft, Fachgesellschaft für Physikerinnen und Physiker

E-ELT: European Extremely Large Telescope, geplantes Großteleskop der ESO mit einem Hauptspiegel von 40 Metern Durchmesser

ESFRI: European Strategy Forum on Research Infrastructures, multidisziplinäre Plattform für die EU-Länder zur Diskussion und Abstimmung von Entwicklungen und Projekten im Bereich von Forschungsinfrastrukturen

ESO: European Southern Observatory, die Europäische Südsternwarte mit mehreren Teleskopen in Südamerika, u. a. dem VLT

ESRF: European Synchrotron Radiation Facility, Großforschungseinrichtung in Grenoble für die Forschung mit Synchrotronstrahlung

EUROBALL: Detektor, der 1997–98 am Nationallaboratorium (LNL) in Legnaro (Italien) und 1999–2003 am Beschleuniger des Kernphysikalischen Instituts der Universität Straßburg eingesetzt wurde

European XFEL: X-Ray Free-Electron Laser, Forschungsprojekt am DESY zum Aufbau eines ca. 3,4 km langen Röntgenlasers

FAIR: Facility for Antiproton and Ion Research, Internationales Beschleunigerzentrum an der GSI, das sich im Aufbau befindet

FLASH: Freie-Elektronen-Laser in Hamburg, Freie-Elektronen-Laser für weiche Röntgenstrahlung, der u. a. zur Erprobung des europäischen Röntgenlaserprojekts European XFEL dient

FORS: Focal Reducer and low dispersion Spectrograph, zwei Spektroskope (FORS 1 und 2) am VLT

FRM II: Forschungsreaktor München II, auch Forschungsneutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz, leistungstärkste deutsche Neutronenquelle

FZJ: Forschungszentrum Jülich, Großforschungszentrum für interdisziplinäre Forschung in den Bereichen Gesundheit, Energie, Umwelt und Information

FZK: Forschungszentrum Karlsruhe, aus dem Kernforschungszentrum Karlsruhe hervorgegangene Einrichtung mit breitem Aufgabenspektrum

GANIL: Grand Accélérateur National d'Ions Lourds, Schwerionenbeschleuniger in Caen (Frankreich)

GERDA: Germanium Detector Array, Experiment am LNGS zur Suche nach dem neutrinolosen Doppelbetazerfall

GSI: GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung, ehemals „Gesellschaft für Schwerionenforschung“, Großforschungseinrichtung in Darmstadt für Atom- und Kernphysik, Plasmaphysik, Materialforschung und Strahlenbiologie

H1: Detektor für die Kollision von Elektronen und Protonen an HERA zur Untersuchung des Protonaufbaus

HERMES: HERA Measurements of Spins, Experiment an HERA zur Untersuchung des Protonspins

HERA: Hadron-Elektron-Ring-Anlage, Ringbeschleuniger am DESY für Elektronen und Protonen, der bis 2007 in Betrieb war

H.E.S.S.: High Energy Stereoscopic System, Teleskop zur Untersuchung der kosmischen Gammastrahlung in Namibia

IceCube: Neutrino-Observatorium in der Antarktis, das sich im Aufbau befindet

ILL: Institut Laue-Langevin, Neutronenforschungszentrum in Grenoble, das u. a. die weltweit stärkste Neutronenquelle betreibt

INFN: Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, italienische Forschungsgesellschaft für Kern-, Teilchen- und Astroteilchenphysik

ISOLDE: On-Line Isotope Mass Separator, Isotopen-Massenseparator am CERN zur Erzeugung radioaktiver Isotope für eine Vielzahl von Experimenten

KAT: Komitee für Astroteilchenphysik, Komitee zur Organisation und Vertretung der gemeinsamen Belange in der deutschen Astroteilchenphysik

KATRIN: Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment, am Forschungszentrum Karlsruhe betriebenes Experiment zur Neutrinomassenbestimmung

KEKM: Kommission Erforschung kondensierter Materie mit Großgeräten, vertritt die gemeinsamen Interessen der gewählten, methodisch orientierten Komitees KFS, KFN und KFSI

KET: Komitee für Elementarteilchenphysik, die Vertretung der deutschen Teilchenphysikerinnen und Teilchenphysiker

KFN: Komitee Forschung mit Neutronen, vertritt alle Wissenschaftler in Deutschland, die mit Neutronen arbeiten oder die der Forschung mittels Neutronen nahestehen

KFS: Komitee Forschung mit Synchrotronstrahlung, vertritt repräsentativ die Nutzer der Synchrotronstrahlung

KFSI: Komitee Forschung mit nuklearen Sonden und Ionenstrahlen, vertritt Forscher im Bereich Sonden und Ionenstrahlen

KHuK: Komitee für Hadronen- und Kernphysik, koordiniert und vertritt die Belange der deutschen Hadronen- und Kernphysiker

KM3NeT: km³ Neutrino Telescope, geplantes Neutrino-Teleskop im Mittelmeer mit einem Volumen von einem Kubikkilometer

KMOS: K-Band Multi-Object Spectrometer, Multi-Objekt-Spektrometer für das nahe Infrarot, das für das VLT entwickelt wird

LBT: Large Binocular Telescope, Sternwarte auf dem Mount Graham in Arizona (USA) mit einem Zwillingspiegel; Deutschland ist mit 25% beteiligt

LEP: Large Electron-Positron Collider, ein ehemaliger Teilchenbeschleuniger für Elektronen und Positronen am CERN

LHC: Large Hadron Collider, Teilchenbeschleuniger für Hadronen am CERN, der 2008 erstmals in Betrieb genommen wurde

LNGS: Laboratori Nazionali del Gran Sasso, ein unterirdisches Labor des INFN für Teilchenphysik im Gran-Sasso-Massiv

LNL: Laboratori Nazionali di Legnano, ein Standort des INFN

LUCIFER: LBT Near Infrared Spectroscopic Utility with Camera and Integral Field Unit for Extragalactic Research, ein Nahinfrarot-Instrument am LBT

MAGIC: Major Atmospheric Gamma-Ray Imaging Cherenkov Telescope, ein Tscherenkow-Teleskop auf La Palma zur Untersuchung kosmischer Gammastrahlung

MINIBALL: mobiles Gamma-Spektrometer, Vorgänger von AGATA

OPERA: Oscillation Project with Emulsion tRacking Apparatus, Experiment zur Neutrinooszillation, dessen Detektor sich im LNGS befindet

PANDA: antiProton ANnihilation at DArmstadt, Experiment an der zukünftigen Beschleunigereinrichtung FAIR zur Untersuchung fundamentaler Fragen der Hadronenphysik

PSI: Paul-Scherrer-Institut, Schweizer Forschungsinstitut für Natur- und Ingenieurwissenschaften in Villigen

PUMA: Dreiachsenspektrometer mit Polarisationsanalyse und Multi-Analysator-Detektor am FRM II

RDS: Rat Deutscher Sternwarten, vertritt die gemeinsamen Interessen aller deutschen astronomischen Institute gegenüber Förderinstitutionen, Regierungen und internationalen Organisationen

REX-ISOLDE: Radioactive Beam EXperiment at ISOLDE, Nachbeschleuniger von ISOLDE

RISING: Rare ISotope INvestigations at GSI, Experiment an der GSI zur Untersuchung exotischer Kerne

SPIRAL: System of production of Radioactive Ions Accelerated in Line, Beschleunigeranlage am GANIL

UNILAC: Universal Linear Accelerator, Beschleuniger für Schwerionen der GSI

VLT: Very Large Telescope, ein aus vier Einzelteleskopen bestehendes Großteleskop der ESO

VST: VLT Survey Telescope, ein Durchmusterungsteleskop der ESO

ZEUS: Detektor für die Kollision von Elektronen und Protonen an HERA zur Untersuchung des Protonaufbaus

Diese Druckschrift wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unentgeltlich abgegeben. Sie ist nicht zum gewerblichen Vertrieb bestimmt. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlwerberinnen/Wahlwerbern oder Wahlhelferinnen/Wahlhelfern während eines Wahlkampfes zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Bundestags-, Landtags- und Kommunalwahlen sowie für Wahlen zum Europäischen Parlament. Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen und an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zwecke der Wahlwerbung. Unabhängig davon, wann, auf welchem Weg und in welcher Anzahl diese Schrift der Empfängerin/dem Empfänger zugegangen ist, darf sie auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Bundesregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

